

Viivi Leskinen

Älypainotuotteen tuotantoprosessin kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Mediatekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

5.5.2017

Tekijä Otsikko	Viivi Leskinen Älypainotuotteen tuotantoprosessin kehittäminen
Sivumäärä Aika	55 sivua 5.5.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Mediatekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Graafinen tekniikka
Ohjaajat	Lehtori Toni Spännäri Tutkijaopettaja Aarne Klemetti
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli tehdä selvitys älypainamisympäristön tuotantoprosessista ja tavoitteena oli suunnitella koeympäristöstä laajennetun mittakaavan tuotantoprosessi älypainotuotteen valmistukseen. Työssä käytettiin prosessiajattelua koetuotantoprosessin hahmottamiseen, perinteisen elektroniikan prosessin tutkimiseen, olemassa olevien tuotantoprosessien tutkimiseen sekä mahdollisten laajennetun tuotantoprosessin tekniikkojen selvittämiseen. Työssä selvitettiin lisäksi painetun älyn mahdollisuuksia elektroniikan nopeana ja edullisena tuotantotekniikkana.</p> <p>Sovellutuksena insinööriyössä oli kapasitiivinen sensori joustavalle hiilinanonuppumateriaalille. Sen toteutettavuutta tutkittiin koetuotanto-olosuhteissa pyrkimällä tuottamaan ammattikorkeakoulun resursseilla toimiva tuote kohtuullisella saannolla. Sensori edustaa orgaanista elektroniikkaa, mutta vertailukohteita otettiin myös epäorgaanisen elektroniikan tutkimuksesta.</p> <p>Koetuotantoprosessin toteutettavuus todennettiin, ja toimiva kapasitiivinen sensori saatiin tuotettua hyvällä saannolla. Painetun elektroniikan etuja tulevaisuuden elektroniikan tuotantotekniikkana saatiin osoitettua, ja käytetty materiaali saatiin esitettävä mahdollisena painetun elektroniikan haasteisiin vastaavana substraattina. Rullalta rullalle -prosessointi havaittiin nopean tuotannon mahdollistavaksi tekniikaksi.</p> <p>Mahdollisia tuotantotekniikoita laajennettuun tuotantoprosessiin löydettiin. Sensorin kontaktipintojen päällystys osoittautui tekijäksi, joka mahdollisesti hidastaisi tuotteen siirtymistä laajamittaiseen tuotantoon siinä käytettävän hopean takia. Tutkimusta voitaisiin jatkaa tutkimalla kontaktipintojen kestävyyttä ilman päällystystä tai jollain muulla mahdollisella materiaalilla. Lisäksi prosessin laajennettavuutta käytännössä tulisi tutkia pilottituotannossa esitettyjen tuotantotekniikoiden ja materiaalin yhteensopivuuden ja tuottavuuden varmistamiseksi.</p> <p>Työ toi esille painetun elektroniikan etuja perinteisen elektroniikan valmistukseen verrattuna ja vastasi painetun elektroniikan haasteisiin koetuotantoprosessissa esitetyllä mahdollisella uudella laajennettavalla tuotantoprosessilla ja siihen sopivalla innovatiivisella materiaalilla.</p>	
Avainsanat	tuotantoprosessin kehittäminen, painettu elektroniikka, rullalta rullalle -prosessointi

Author Title	Viivi Leskinen Production process development for a printed intelligence product
Number of Pages Date	55 pages 5 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Media Technology
Specialisation option	Graphic Technology
Instructors	Toni Spännäri, Senior Lecturer Aarne Klemetti, Researching Lecturer
<p>The objective of the thesis was to study the production process of a printed intelligence product and the aim was to furthermore develop it to concern a larger scale production process. The study used process thinking to perceive the experimental production process, to study traditional production process of electronics, to study existing production processes and to determine possible production techniques for the large-scale process. The study also investigated the potentiality of printed intelligence as a fast and low-cost electronics production method.</p> <p>The application of the studied process was a capacitive sensor on a flexible carbon nanobud material. Its feasibility was studied at experimental production circumstances at a University of Applied Sciences with the resources available. The application was produced to form a functioning product with a moderate yield. The sensor is an application of organic electronics but inorganic electronics studies were also compared.</p> <p>The thesis proved the feasibility of the capacitive sensor and its production process. The yield was appropriate. The potentiality of printed electronics as a production technique for future electronics was indicated. The material in use was presented as a plausible substrate solution for printed electronics challenges. Roll-to-roll processing was perceived as the technique that enables fast processing.</p> <p>Potential production technologies were found for the large-scale process. The printed ink that would use silver to form conductivity was a factor that was found to possibly restrain the process scalability. The study could be extended to examine the durability of the contact area of the sensors or to search for a new ink or joining material. In addition, the process scalability should be audited in pilot manufacturing conditions to confirm the compatibility of the production techniques and base material, as well as productivity.</p> <p>The thesis observed the usefulness of printed electronics in electronics manufacturing and responded in some of the challenges of printed electronics with a possible new production process and material represented in the scaled up experimental production process.</p>	
Keywords	production process development, printed electronics, roll-to-roll processing

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Painettu äly nousevana teknologiateollisuuden alana	2
3	Prosessiajattelu tuotannossa	5
3.1	Prosessiajattelu	5
3.2	Prosessin mallintaminen ja analysointi	8
3.3	Perinteisen elektroniikan tuotantoprosessi verrattuna älypainamiseen	11
4	Painetun elektroniikan tekniikat	14
4.1	Materiaalit	14
4.2	Painotekniikat	16
4.3	Kosketuksettomat päällystystekniikat	19
4.4	Poistavat tuotantotekniikat	19
4.5	Laminointi	19
4.6	Nopean tuotannon tekniikat	20
5	Kapasitiivisten sensoreiden älypainoprosessit	23
5.1	Mustesuihkuprosessi	23
5.2	Silkkipainoprosessi	23
5.3	Syväpainoprosessi	24
5.4	Prosessi koetuotannossa	26
5.4.1	Materiaalit	26
5.4.2	Tuote	28
5.4.3	Laitteet ja ohjelmat	30
5.4.4	Prosessikuvaus	31
5.4.5	Mittaustulokset	37
5.4.6	Prosessikaavio	38
6	Koetuotantoprosessin laajentaminen	39
6.1	Koetuotantoprosessin elinvoimaiset piirteet	39
6.2	Osaprosessien automatisointi	40
6.3	Prosessikaavio	47

7 Yhteenveto	47
Lähteet	50
Liitteet	
Liite 1. Mittaustilanteiden olosuhteet	
Liite 2. Mittaustulokset	

Lyhenteet

R2R	Roll-to-roll processing. Rullalta rullalle tapahtuva valmistustekniikka.
DDP	Direct Dry Printing®. Hiilinanonuppumateriaalien tuotantotekniikka.
PET	Polyethylene terephthalate. Polyetyleenitereftalaatti.
ITO	Indium Tin Oxide. Indiumtinaoksidi.
CNB™	Carbon NanoBud™. Hiilinanonuppu.

1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on tehdä selvitys älypainamisympäristön tuotantoprosessista ja suunnitella koeympäristöstä laajennetun mittakaavan tuotantoprosessi älypainotuotteen valmistukseen. Työssä tutkitaan koetuotantoprosessissa käytettäviä tekniikoita ja niitä analysoimalla prosessimallia laajennetaan koskemaan laajempaa tuotantoa.

Prosessiajattelua voidaan käyttää tuloksellisuuden kehittämiseen. Sitä voidaan soveltaa prosessin kehityksessä tuottavuuden parantamiseen. Tässä työssä tuloksellisuutta tarkastellaan toimivuuden, toteutettavuuden ja saannon avulla. Koetuotantoprosessin tulee olla toimiva, aikaansaadun tuotteen tulee toimia ja saannon tulee olla kohtuullinen. Lisäksi tutkitaan tuotantoprosessin toteutettavuutta laajassa mittakaavassa: millä tekniikoilla prosessi voidaan laajentaa koskemaan suurempaa tuotantomäärää. Tuloksellisuutta kehitetään keräämällä tietoa sen tasosta sekä syistä, jotka lisäävät tai heikentävät sitä. Prosesseja mallintamalla voidaan tehdä havaintoja nykyisistä prosesseista sekä tehdä tavoiteprosessimalleja. Mallien avulla prosessin mahdolliset kehityskohteet tulevat esiin. [1, s. 3.]

Tavoitetuotantoprosessimallia muodostettaessa tulee ensin tutkia nykyistä prosessia. Kun kyseessä on uusi prosessi, saadaan tietoa niistä prosesseista, joilla kyseessä olevia elektroniikan sovellutuksia on aiemmin toteutettu. Tällä perusteella työssä tutkitaan ensin perinteistä elektroniikan valmistuksen prosessia sekä älypainamisprosessia vastaavien sovellutusten osalta. Näistä saadaan pohjaa laajennetulle prosessimallille. Lisäksi tutkitaan ja analysoidaan ammattikorkeakouluympäristössä toteutettavaa koetuotantoprosessia. Koetuotanto toteutetaan graafisessa ympäristössä, eikä se siten ole optimaalinen.

Koetuotantoprosessi käyttää materiaalinaan hiilinanonuppukalvoa, jonka toiminnallisuuden pohjalla olevan keksinnön ja innovatiivisen tuotantoprosessin on kehittänyt Canatu Oy. Materiaali voi tulevaisuudessa mahdollistaa elektroniikan valmistuksen uudella innovatiivisella ja kustannustehokkaalla tavalla. Koetuotantoprosessissa tutkitaan kapasitiivisen sensorin toteuttamiskelpoisuutta tuotteena tälle materiaalille.

Painettu elektroniikka voidaan jakaa epäorgaaniseen ja orgaaniseen elektroniikkaan, jota koetuotantoprosessissa tuotettu tuote edustaa. Epäorgaaninen elektroniikka käyttää

perinteisen elektroniikan tapaan epäorgaanisia aineita, kuten hopeaa ja kuparia, painoväreissä ja musteissa, kun orgaaninen elektroniikka taas pohjautuu orgaanisten hiilipohjaisten polymeerien ja pienmolekyylien käyttöön usein joustaville materiaaleille. Näillä on monia etuja epäorgaaniseen elektroniikkaan nähden, ja uudet tekniikat on nähty ratkaisuna painetun elektroniikan skaalautumisessa massatuotantoon.

Koetuantoprosessissa käsitellään orgaanisen elektroniikan sovellutusta, joka tarkemmin määriteltynä on kapasitiivinen sensori. Painotekniikoiden ja niiden tuotantoprosessien tutkimiseen otetaan tästä näkökulma: yritetään löytää vertailukohteita perinteisen elektroniikan, painetun epäorgaanisen elektroniikan ja painetun orgaanisen elektroniikan valmistukseen valituista tekniikoista. Olemassa olevia älypainoprosesseja etsiessä keskitytään kapasitiivisia sensoreita tai vastaavia tuotoksia tuottaviin prosesseihin.

Näitä prosesseja tutkimalla työssä on tarkoitus muodostaa prosessimalli, joka on tarkoitettu suurempaa tuotantomäärää varten ja joka voisi jatkokehittämällä kilpailla perinteisen elektroniikan valmistuksen kanssa. Luvussa 2 pohjustetaan älypainamisen valitsemista insinööriyön aiheeksi käymällä läpi painetun älyn mahdollisuuksia alana.

2 Painettu äly nousevana teknologiateollisuuden alana

Painettu äly luo painotuotteelle toiminnallisuutta ja tuo sen osaksi laajempaa systeemiä. Tuote saadaan osaksi informaatioverkkoa, ja se voi tuottaa sekä näyttää tietoa, esimerkiksi painetulla näytöllä. Tuotteen toiminnallisuus valmistetaan perinteisillä painomenetelmillä, uusien prosessien ja materiaalien, kuten joustavien kalvojen ja johtavien painovärien ja musteiden, avulla. Elektroniikan valmistuksessa painaminen on tuotantomenetelmänä nopeampi ja halvempi kuin perinteiset elektroniikan valmistuksen menetelmät, eikä se välttämättä tarvitse puhdistilatyöskentelyä. Painetun elektroniikan edut perinteiseen elektroniikkaan verrattuna ovat tuotteiden edullisuus, ohut rakenne, keveys ja taipuisuus sekä matalat investointikustannukset [2, s. 8]. Jo olemassa olevat teollisuuden alat hyödyntävät painettua älyä, sillä se on uusi innovatiivinen teknologia-ala ja se tarjoaa ratkaisuja elektroniikkateollisuutta nyt haastaviin tekijöihin, kuten teknologioiden monimutkaistumiseen ja tuotteilta vaadittaviin lyhyisiin tuotantoaikoihin. Tuotteita ovat yleensä kertakäyttöiset sensorit, yksinkertaiset elektroniset piirit laajoille pinta-aloille, toiminnalliset paperin kaltaiset tuotteet, pakkaukset, kodinteknologia, painetut ja orgaanista valoa emittoivat diodit sekä orgaaniset aurinkokennot. [3, s. 8.]

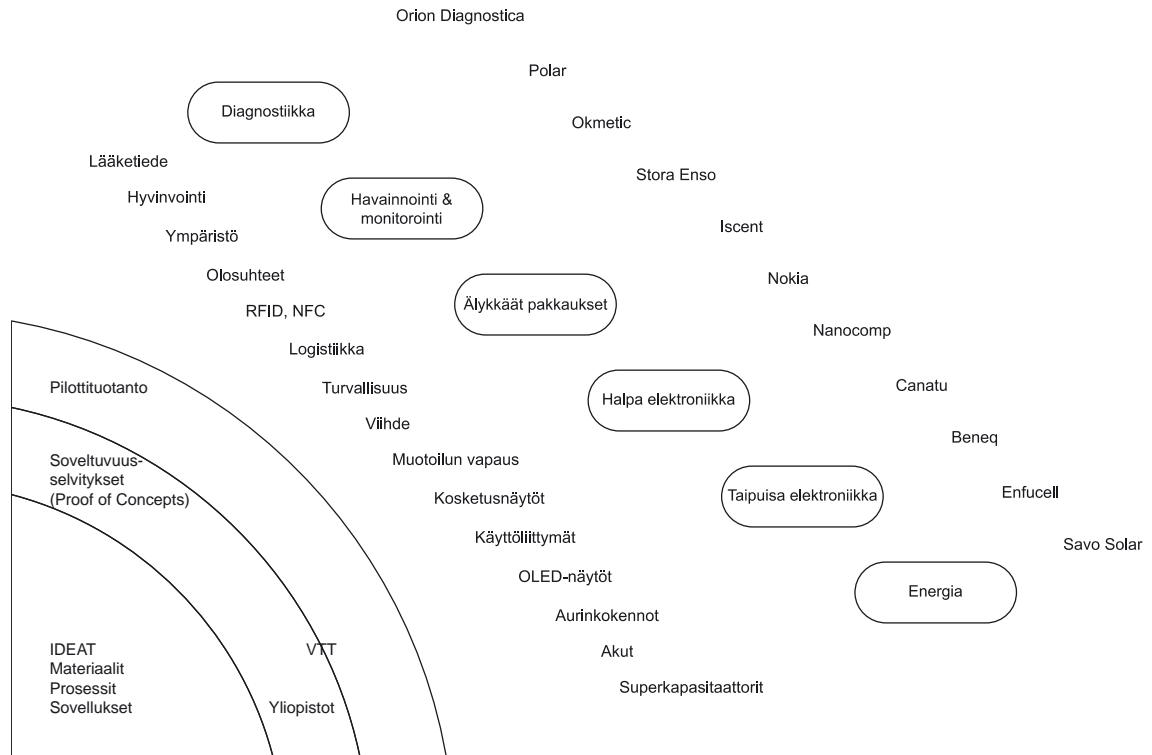
Yleisesti painetun elektroniikan läpimurtoa markkinoille odotetaan, mutta sen edellytykseksi on nimetty alan kypsyminen tiettyyn tasoon, jossa se voi tuottaa erilaisia sovellutuksia markkinoille. Jokaiselle tuotteelle tulee löytää oikea markkina-ala. Kun on saavutettu markkinarako yksityisesti omistetuilla standardeilla ja on selvitty pääasiallisista teknologisista haasteista, voidaan siirtyä massatuotantoon. Massamarkkinoilla globaali standardisointi on tärkeää. [4, s. 131.]

Painettavan elektroniikan prosesseihin tarvitaan suunnittelua, jotta osaprosessit saadaan sovitettua yhteen ja painetun älyn teollisen tuotannon mahdollisuudet käytäntöön. Haasteita ovat esimerkiksi standardien keskeneräisyys, usean painoyksikön tuotantoa vaativat komponentit, painettavien materiaalien ympäristövaikutukset ja niiden kustannukset. Painettu elektroniikka on suhteellisen uusi ala, joten se ei voi siirtyä teolliseen tuotantoon eristyksissä. Useat organisaatiot ovat aloittaneet työn alan standardisoinnin kehittämiseksi. Aktiivisimmat ja kehittyneimmät organisaatiot tässä ovat International Organization for Standardization (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC) ja Association Connecting Electronics Industries (IPC). Muita mainittavia ovat myös Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ja Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI). Esimerkiksi IEC Technical Committee 119 standardisoi alan terminologiaa, materiaaleja, prosesseja, laitteita sekä terveys-, turvallisuus- ja ympäristönäkökohtia. IEC TC 119 on kehittynyt merkittäväksi yhteisöksi, joka on aloittanut useita projekteja, joiden tarkoitus on tuottaa mittausmenetelmiä, jotka luovat vakaan pohjan teollistumiselle. Monissa tapauksissa tämä uusi teollisuudenala tulee tuottamaan painettuja komponentteja, jotka integroidaan muihin sähkötekniisiin komponentteihin tuotteiden valmistamiseksi. IEC TC 119 on täten myös yhteistoiminnassa muiden teknisten komiteoiden ja ulkoisten organisaatioiden kanssa. [5; 6; 7, s. 120–122.]

Älypainaminen on nopeasti kasvava teknologia-ala. Yleensä ISO- ja IEC-standardisatiokäytännöt tuottavat yksittäisen standardin kahdessa, kolmessa vuodessa, mutta näin pitkät ajanjaksot ovat liian pitkiä nopeasti kehittyville aloille. IPC perusti vuonna 2011 painetun elektroniikan aloitteen, jonka tarkoituksena oli ohjata oleellisia tekijöitä painetun elektroniikan maailmanlaajuisen teollisuuden kehittämiseksi. Aloite on poikunut jo ensimmäiset käyttötason standardit. [7, s. 122.]

Graafisen teollisuuden ennakointiryhmä pitää painettua älykkyyttä mahdollisena painotuotteiden arvostusta ja markkina-arvoa lisäävänä tekijänä. Graafisen alan kehityspäälliköltä odotetaan älypainamiseen liittyvien asioiden hallintaa. Suomessa älypainamisen

sovelluskenttä on muodostumassa yliopistojen, VTT:n ja yritysten verkostoksi, jossa tapahtuu jo pilotti- ja teollista tuotantoa. [8, s. 18; 9, s. 9.] Sovelluskenttä on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Älypainamisen sovelluskenttä, esimerkkejä käyttöalueista ja yrityksistä [9, s. 54].

Älypainamisen sovelluskentässä voidaan nähdä esimerkiksi tämän työn koetuantopro- sessiin materiaalin tarjonnut Canatu. Teknologian tutkimuskeskus VTT on merkittävä te- kijä alalla; se tekee tutkimusta, soveltuvuusselvityksiä ja pilottituotantoa.

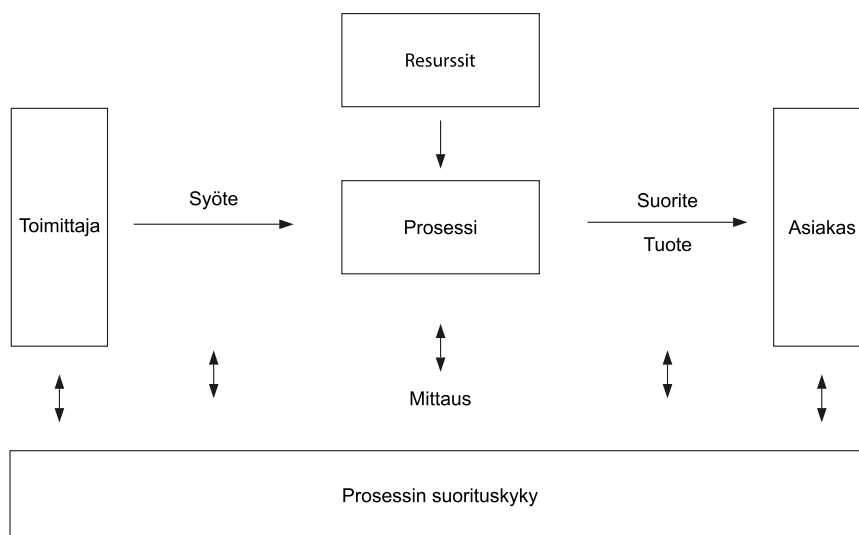
Moniosainen jälkikäsittely tuo painetun elektroniikan tuotevalikoimaan erilaisia mahdolli- suuksia. Itse painamisen jälkeen tuotteeseen voidaan laminoida erilaisia kerroksia, jotka yhdessä tuovat tuotteelle toiminnallisuutta. Myös aiemmin mainittu integraatio muihin sähkötekniisiin komponentteihin kasvattaa sovellusala. Orgaaninen ja painettu elektro- niikka mahdollistaa monella teollisuusallalla uusia sovellutuksia. Sovellutuksia on tulossa kuvassa esiteltävien alojen lisäksi muun muassa itse painotuotantoon ja graafiselle alalle, tekstiileihin ja muotiin, rakentamiseen ja arkkitehtuuriin, kodintekstiileihin, valais- tukseen, kuluttajaelektroniikkaan sekä autoteollisuuteen. [10, s. 9.]

Orgaanisen ja painetun elektroniikan teollisuuden myyntivoiton odotettiin nousevan 11 % vuonna 2016 Organic and Printed Electronics Association (OE-A) -verkoston LOPEC 2016 -painetun elektroniikan kansainvälisillä messuilla tehdyn liiketoimintaympäristökyseilyn mukaan. PrintoCent-keskuksen johtaja Ilkka Kaisto pitää painettua älyä mahdollisena Suomen teollisen tuotannon kasvuun nostajana. PrintoCent-innovaatiokeskusohjelma muovaa käynnissä olevista painetun elektroniikan tutkimus- ja kehityshankkeista liiketoimintaa. PrintoCent-keskuksen perustajajäseniä ovat VTT, Oulun yliopisto, Oulun ammattikorkeakoulu ja Oulu Innovation Oy. [11; 12;13.]

3 Prosessiajattelu tuotannossa

3.1 Prosessiajattelu

Prosessi on tapahtumaketju, joka koostuu toisiinsa kytkeytyneistä tapahtumista. Se on rakennettu, mitattu sarja toimintoja, jotka on suunniteltu tietyn tuotoksen tuottamiseen tietylle asiakkaalle tai markkinalle. Siihen käytetään resursseja, joilla syötteet muutetaan tuotoksiksi, kuten kuvassa 2 on havainnollistettu. Tuotos voi olla valmis tuote tai seuraavan osaprosessin syöte. Tuotanto on usein vaiheittain etenevä prosessi, joka voidaan mallintaa syy-seuraussuhteiden avulla. Siinä osaprosessien eli työvaiheiden suoritusjärjestys on ennalta määrätty ja optimoitu. [1, s. 8; 14, s. 2.]



Kuva 2. Prosessi kuvattuna suhteessa siihen liittyviin tekijöihin [15, s. 169].

Prosessisuunnittelun tavoite on prosessin kuvauksen ja kehityksen avulla parantaa tuloksellisuutta. Prosessijohtamisen taustalla on tavoite luoda riittävästi arvoa suhteessa kustannuksiin. Prosessien mallintamista tarvitaan, jotta voidaan keskittää resurssit toimintaan, joka tuottaa lisää arvoa, eli ymmärtää, mikä on kriittistä toimintaa arvonluonnin kannalta. Samalla voidaan minimoida tekijät, jotka heikentävät tuloksellisuutta. Prosessien kuvaamisessa voidaan keskittyä kokonaisprosessin tunnistamiseen, mutta myös yksittäisiin arvoa lisääviin prosesseihin. Prosessien tunnistamisessa ja kehittämisessä oleellista on keskeisten resurssien ja vastuualueiden tunnistaminen ja niiden kohdentaminen. [16, s. 10.]

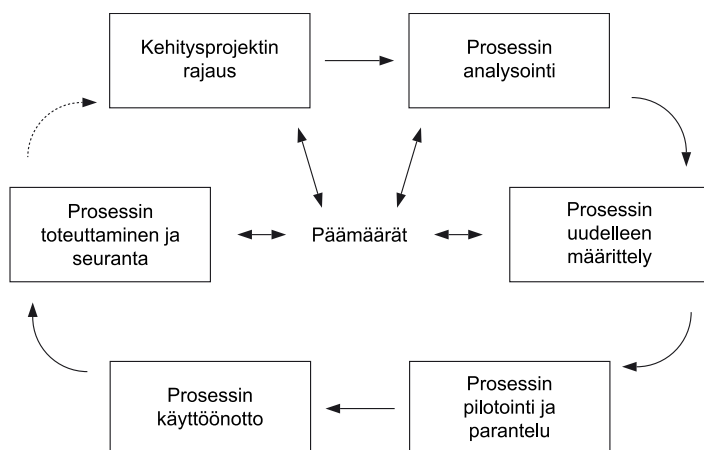
Prosessiajattelussa tärkeitä ovat työkalut, dokumentointi ja tietojärjestelmät. Ne ovat keinoja toteuttaa työvaiheiden automatisointia. [1, s. 3.] Liiketoimintaprosessin hallinta voidaan nähdä kolmen prosessinhallinnallisen suuntauksen yhtymänä. Nämä kolme suuntausta ovat prosessiajattelu itsessään, automaatio ja laatuajattelu. [17, s. 433.]

Prosessiajattelu on lähtenyt ensimmäisenä aaltona tieteellisestä prosessinhallinnan ajattelutavasta, jossa liiketoimintaprosessit nähtiin kokoonpanolinjan toimina. Toisena aaltona voidaan nähdä liiketoimintaprosessien uudistaminen, jossa sovelletaan teknologiaa ja hallintatiedettä olemassa olevien systeemien muuttamiseen sekä organisaatioiden, prosessien ja tuotteiden tehostamiseen, jotta niistä tulee tehokkaampia, suorituskykyisempiä ja paremmin tarvetta vastaavia. [17, s. 433; 18, s. 1829.]

Automaatio on kehittynyt laskennan automaatiosta työnkulun automatisointiin. Internetin ja oheisohjelmistojen, esimerkiksi www-sovelluspalveluiden, avulla organisaatorajojen ylitys on tullut mahdolliseksi. Wwv-sovelluspalvelut ovat ohjelmistojärjestelmiä, jotka on suunniteltu tukemaan yhteensopivien tietokoneiden välistä kanssakäymistä tietoverkon yli. Automatisaation alussa kyse oli työnkulun yksinkertaistamisesta ja siitä, miten työntekijät ja esimiehet toteuttivat prosessia. Myöhemmin asiantuntijoiden päätöksentekoa automatisoitaessa huomattiin, että lähes jokainen organisaation prosessi voitaisiin automatisoida. [17, s. 433; 19; 20, s. 49.]

Laatuajattelu on laadun tarkastelua ja sen ottamista olennaiseksi osaksi organisaation normaaleja toimintatapoja. Sitä käytetään esimerkiksi laaja-alaisessa laatujohtamisessa tai jatkuvan parantamisen periaatteessa, Kaizenissa. Laatuajattelussa tärkeää on laadun mittaaminen, jota voidaan tehdä esimerkiksi Six Sigma -mallilla. [17, s. 433.]

Prosessisuunnittelussa voidaan tunnistaa nykyinen prosessi, joka tarkoittaa prosessia sellaisena, jona se nyt toteutuu, sekä tavoiteprosessi, joka tarkoittaa prosessia sellaisena, jona se toteuttaisi tuloksellisuustavoitteita. Näiden kahden erot kertovat muutostarpeesta. Prosessin kehittämisen yleiset vaiheet ovat prosessin analysointi, prosessin uudelleen määrittely, prosessin pilotointi ja parantelu, prosessin käyttöönotto, prosessin toteuttaminen ja seuranta sekä kehitysprojektin rajausta. [1, s. 4.] Nämä vaiheet on asetettu suhteessa toisiinsa ja päämääriin kuvassa 3.



Kuva 3. Prosessien kehittämisen yleiset vaiheet [1, s. 6].

Tuloksellisuustavoitteiden toteuttamisen lisäksi prosessilla voi olla muitakin tarkoituksia. Kun ne ovat selvillä, voidaan tunnistaa prosessista kriittiset vaiheet. Jotkut prosessivaiheet vaikuttavat oleellisesti prosessin suorituskyykyyn, ja nämä vaiheet täytyy tunnistaa. Prosessin kehittäminen ohjataan koskemaan ensisijaisesti kriittisiä vaiheita. Kriittinen vaihe voi muodostaa prosessille pullonkaulan, jos se on esimerkiksi paljon hyötyä tuottava, jos se vie paljon aikaa tai resursseja tai jos se sisältää suuria riskejä. [15, s. 167–168.]

Prosessin kehittämistä voidaan tehdä jatkuvan parantamisen periaatteesta, jossa korostetaan tiedon analysoinnin merkitystä. Jatkuvan parantamisen malleja on yleisissä laatuteorioissa, kuten Statistical Process Control, Six Sigma / Design-Measure-Analyze-Improve-Control, Deming / Plan-Do-Check-Act, kokeellinen suunnittelu / Design of Experiment ja Kaizen. Näissä menetelmissä käytetään analyysityökaluja, kuten pareto, kalanruoto ja vuokaavio. [16, s. 40.]

Tavoiteprosessin määrittämistä tulisi seurata pilotointi, jolla prosessia tutkitaan käytännössä ja voidaan havainnoida, onko prosessissa virheitä tai puutteita. Pilotointi voi tapahtua todellisten olosuhteiden sijaan mallinnetuissa olosuhteissa. Tällä pyritään saamaan tietoa siitä, toimiiko prosessi, kuten on odotettu ja kuten halutaan. [1, s. 7.]

Käyttöön otetun prosessin toimivuutta voidaan arvioida mittaamalla. Prosessia voidaan mitata joka prosessivaiheesta alkaen toimittajalta tulevasta syötteestä ja päättyen asiakkaaseen, kuten on havainnollistettu kuvassa 2. Mittaustietojen avulla voidaan kattavasti tehdä johtopäätöksiä prosessin suorituskyvystä. Mittauskohteita valitaan prosessivaiheiden kriittisyyden mukaan. Esimerkiksi tuotantoprosessista voidaan esimerkiksi mitata syötteen vastaavuutta annettuihin kriteereihin poikkeamien lukumäärässä, tuotteen vastaavuutta annettuihin kriteereihin poikkeamien lukumäärässä, kannattavuutta valmistusneiden tuotteiden lukumäärässä, tehokkuutta ja tuottavuutta hinta-kustannusvertailulla, läpimenoaikaa ja hävikkiä. Mittaaminen kuuluu olennaisesti laatuajatteluun. [15, s. 169–170.]

3.2 Prosessin mallintaminen ja analysointi

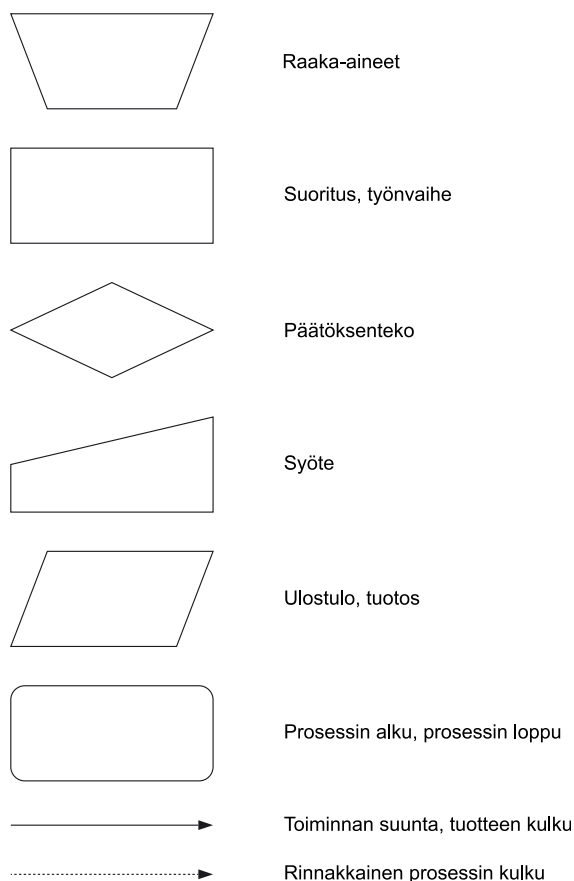
Mallintamista voidaan kutsua myös prosessien kuvaamiseksi. Sen avulla pyritään ymmärtämään, mikä on kriittistä toimintaa arvonluonnin näkökulmasta. Prosessin kehitys aloitetaan rajaamalla prosessi, jota muutos koskee. Prosessi pitää aina sijoittaa kontekstiin, sillä se on osa arvoketjua, johon kuuluvat asiakkaan lisäksi myös yritys ja sen alihankkijat. Asiakas- ja arvoketjujen tunnistuksen jälkeen voidaan miettiä, mitkä prosesseista ovat ydinprosesseja eli tuottavat eniten lisäarvoa asiakkaalle ja miten ne kytkeytyvät muihin prosesseihin. Käytännössä prosessin mallintaminen on osa prosessin analysointia, sillä prosessimallin muodostaminen edellyttää prosessin tutkimista. [16 s. 10; 1, s. 8–9.]

Prossessimalli on mikä tahansa abstrakti kuvaus prosessista. Se voi olla yksinkertainen, kuten laatikoista ja nuolista koostuva diagrammi, tai monimutkainen, kuten tietokoneohjelmalla toteutettu prosessisimulaatio. Vuokaavio on yksinkertainen ja hyvin paljon käytetty prosessinmallinnustyökalu. Se on graafinen kuvaus konkreettisten tai abstraktien nimikkeiden, kuten materiaalien, dokumenttien tai logiikan, liikkumisesta tai virrasta. Vuokaaviot saivat alkunsa matemaatikoiden ja tietokoneohjelmoiden yrityksestä jäljittää

algoritmien loogisia reittejä. Vuokaavio on selkeä graafinen esitys prosessista alusta loppuun riippumatta siitä, onko kyseessä esimerkiksi algoritmi tai tuotantoprosessi. Vuokaavion yksinkertaisuus korostaa itse prosessia tuomatta työkalua esille. [21, s. 184.]

Prosessin mallintaminen lähtee liikkeelle syötteiden ja tuotosten tunnistamisesta. Niiden suhteen mietitään prosessiin liittyvien resurssien, kuten materiaalien ja koneiden osuus. Arvoa lisäävät tehtävät muodostavat prosessin vaiheet. Prosessikuvauksen yksityiskohtaisuus riippuu siitä, onko prosessi tarkoitus toistaa täsmälleen samalla tavalla vai voidaan se toteuttaa ilman yksityiskohtaista järjestystä. [1, s. 9–11.]

Itse prosessikuvauksessa voidaan käyttää vuokaavion lisäksi esimerkiksi tehtävämatriisia, niin sanottua uimaratakaaviota tai prosessin tekstimuotoista ohjeistamista. Näihin liittyy usein vakiintuneita merkintätapoja, joita on esitetty kuvassa 4 [1, s. 11].



Kuva 4. Prosessikuvauksessa vakiintuneita merkintätapoja [21, s. 185; 22].

Vakiintuneilla merkintätavoilla on eri prosessikuvauksissa hieman erilaisia merkityksiä, joten tätä insinööriötä varten kuvaan 4 on merkitty käytetyt merkitykset kullekin merkinnälle. Esimerkiksi syöte tarkoittaa yleensä manuaalista syötettä tai tehtävää, mutta tässä yhteydessä se on prosessiin syötettävä materiaali.

Kaavioita täydentämään käytetään usein sanallista kuvausta. Kuvauksessa käydään läpi prosessin keskeiset asiat. Kuvaus kertoo prosessin oleellisista tekijöistä, kuten resursseista, menetelmistä, työkaluista, tuotoksesta ja ympäristöstä ja sen tehtävä on tuoda esiin prosessin kriittisimmät asiat tai tehtävät, kuvata asioiden ja tehtävien väliset riippuvuudet, edistää yhteistyötä ja määrittää roolit ja vastuut. Olli Lecklinin mukaan [23 s. 137–139.] prosesseista tulisi määritellä ainakin soveltamisalue, asiakkaat, tavoitteet ja raaka-aineet, ja sen tulisi sisältää prosessikaavio, kertoa ympäröivistä prosesseista ja osoittaa osallistujat ja heidän vastuualueensa. Sanallinen kuvaus nousee taulukkomuotoisessa ohjeistamisessa ja prosessinmallintamisessa oleelliseen osaan. Taulukolla voidaan selventää prosessin vaiheisiin liittyvät oleelliset tekijät. Se sisältää enemmän ja yksityiskohtaisempaa tietoa kuin prosessikaavio. [1, s. 11; 16, s. 123–124; 23 s. 137–139.]

Prosessin arvoanalyysi kehitettiin yleiskustannusten pienentämiseksi. Arvoanalyysin ideana on analysoida systemaattisesti prosessien kuluja ja arvoja. Se on melko yksinkertainen lähestymistapa, jossa tutkitaan prosessin osa-alueita ja työvaiheita prosessin kulun ymmärtämiseksi. Lähtökohdaksi otetaan vallitseva prosessi, josta dokumentoidaan kulunut aika ja jokaisen työvaiheen kustannukset. Jokaisen työvaiheen arvoa verrataan sisäisten ja ulkoisten asiakkaiden sille asettamiin vaatimuksiin. Työn vaiheet, jotka eivät lisää arvoa prosessin tuotokselle asiakkaan nähden voidaan karsia tai uudistaa. [24, s. 144.]

Prosessin analysoinnissa yleensäkin keskitytään prosessin suorituskyykyyn. Prosessista tutkitaan, miten hyvin se suoriutuu sille asetetuista tavoitteista. Analyysi voidaan rakentaa vanhojen kerättyjen tietojen varaan, tai sitä voidaan tehdä reaaliaikaisilla analyysitekniikoilla, joilla tarkastellaan prosessin vallitsevaa tilaa. [25, s. 2.]

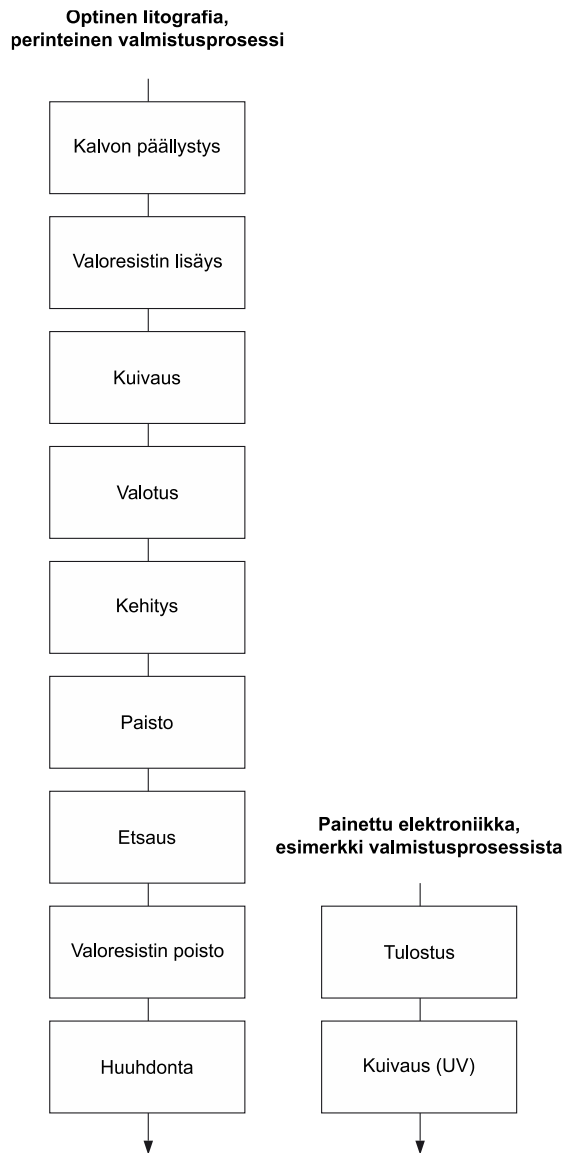
Tilastollinen prosessinohjaus kerää ja käyttää dataa prosessin ohjaamiseen ja sen puutteen ennaltaehkäisemiseen. Prosessin tuloksellisuutta voidaan tutkia systemaattisella tiedonkeruulla. Siltä vaadittavia asioita on pidettävä ajantasaisina. Laatukustannusten

mittaus on tehokas työkalu prosessin ongelma-alueiden löytämiseksi ja hallinnan suorituskyvyn seuraamiseksi. Tilastollinen prosessinohjaus on olemassa ikuisen vaihtelevuuden takia; materiaalien, tuotteiden, palveluiden ja ihmisten ominaisuudet vaihtelevat aina. Vaihtelevuutta täytyy ymmärtää ja arvioida sen hallitsemiseksi. Tilastollisessa prosessinohjauksessa käytetään työkaluina prosessin mallinnusta vuokaavioilla (mitä tehdään), datan luontipaikalta reaaliaikaisesti lomakkeeseen kerättyä dataa (kuinka usein tehdään), histogrammeja (kuvaaja vaihtelevuudesta), graafeja (kuvaaja vaihtelevuudesta ajan kanssa), Pareto-analyysiä (mikä aiheuttaa ongelmat), pistediagrammeja (suhteiden tutkiminen) ja hallintakaavioita (vaihtelevuuden tarkastelu ajan kuluessa). Työkalujen käyttö ja ymmärtäminen ei edellytä aikaisempaa tietämystä tilastollisista menetelmistä. [26, s. 20–21.]

3.3 Perinteisen elektroniikan tuotantoprosessi verrattuna älypainamiseen

Elektroniikkateollisuus on suuressa osassa modernia teollisuutta, ja elektroniikkajärjestelmät ovat yhä tärkeämmässä roolissa enemmistössä nykyajan tuotteita. Elektroniikkajärjestelmiä yleisesti toteutetaan painetuilla piirilevyillä, joten painettujen piirilevyjen valmistuksesta on muodostunut tärkeä osa elektroniikan tuotantoteollisuutta ylipäänsä. Tehokas toimiminen alalla vaikeutuu koko ajan, sillä yritysten pitää tuottaa korkeiden laatustandardien mukaisia tuotteita, sopeutua jatkuvasti muuttuviin teknologioihin, käyttää lyhyitä tuotantojaksoja sekä tuottaa jatkuvasti laajenevaa tuotekirjoa kasvavalla monitkaisuudella. Näiden seikkojen takia tuotannon prosessien suunnittelua täytyy tehdä jatkuvasti, jotta voidaan vastata tuotannon olosuhteiden muutoksiin. [27, Abstract.]

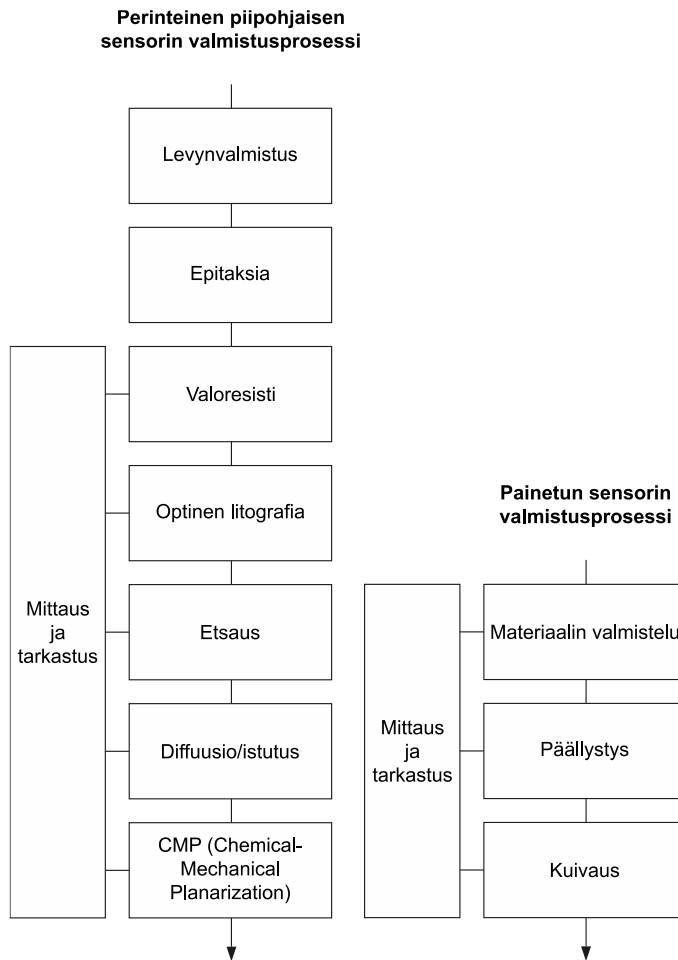
Perinteinen elektroniikan valmistusprosessi voidaan kuvata esimerkiksi hyvin tavallisen tuotantoprosessin, optisen litografian, avulla. Tällä prosessilla on perinteisesti valmistettu puolijohteita. Tuotantoprosessissa on yksinkertaistettuna yhdeksän osaa, jotka on kuvattu kuvassa 5.



Kuva 5. Optisen litografian tuotantoprosessi verrattuna painetun elektroniikan tuotantoprosessiin [28, s.8].

Kun sama puolijohteen tuotantoprosessi tehdään painomenetelmillä, voi tuotantoprosessikaavio näyttää kaksivaiheiselta: ensin tehdään painatus ja sen jälkeen se kuivataan esimerkiksi UV-valolla. Arvioitu kulunsäästö näyttökomponenteille on tässä esimerkissä 50 %. [28, s. 8.]

Jos tarkastellaan erityisesimerkkinä sensorin valmistusta, huomataan, että perinteinen piipohjainen sensorin valmistusprosessi kokonaisuudessaan on monimutkaisempi kuin vastaava painetun sensorin valmistusprosessi. Molemmat prosessit on havainnollistettu yksinkertaisella mallilla kuvassa 6.



Kuva 6. Perinteisen piipohjaisen sensorin valmistusprosessi verrattuna painetun sensorin valmistusprosessiin [29, s. 6].

Perinteiset mikroelektroniikan tuotantoprosessit eivät sovellu orgaanisten puolijohteiden valmistukseen puolijohteiden sulamispisteen, liukoisuuden ja mekaanisten ominaisuuksien takia. Olemassa olevat prosessit ovat kuitenkin niin tehokkaita ja hyvin osattuja, että alun perin orgaanisten puolijohteiden tuotantoprosessit käyttivät näitä tekniikoita, kuten hapettumista ja optista litografiaa, hyväksi. Orgaaniset transistorit tuotettiin siis alun perin piiteknologialla. Nämä tuotantoprosessit eivät kuitenkaan käytä hyväksi orgaanisten materiaalien etuja, kuten alhaista hintaa, suurta pinta-alaa ja taipuisia materiaaleja. [30, s. 21–22.]

4 Painetun elektroniikan tekniikat

4.1 Materiaalit

Painettaville materiaaleille on erityisiä vaatimuksia elektroniikan valmistuksessa. Niiden pitää ensinnäkin olla sähköisesti toiminnallisia ja lisäksi materiaalien tulee olla prosessoitavia nestemäisessä muodossa. On sanottu, että yhtenäisen elektroniikan painotuantoprosessin aikaansaamiseksi on valittava johtava painoväri, jolla on oikeanlaiset reologiset ominaisuudet. Reologiset ominaisuudet tarkoittavat painoväriin virtauskäyttäytymistä eri tilanteissa, kuten painoväriin siirrossa paperille ja värin imeytymisessä paperiin. Monia materiaaleja on tutkittu edullisen, kevyen painetun elektroniikan valmistuksen aikaansaamiseksi. Erilaiset painotekniikat vaativat monenlaisia parametreja painoväriä, kuten oikeanlainen viskositeetti, pintajännitys, johtavuus ja yhteensopivuus liuottimien kanssa. Pintajännitys on osa painoväriin pintakemiallisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat oleellisesti värinsiirtoon ja painojäljen muodostumiseen. Painoväriin pintajännityksen ollessa pienempi suhteessa painomateriaalin pintaenergiaan leviää nestemäinen painoväri kiinteälle pinnalle hyvin. Sen ollessa suurempi leviäminen ja tarttuminen ei tapahdu ja neste jää helmeilemään materiaalin pinnalle. [31, s. 3165; 32, s. 79.]

Perinteisessä painamisessa painojäljestä halutaan visuaalisesti hyvä, mutta elektroniikan painamisessa oleellista on mahdollisimman yhtenäinen painojälki, jotta saadaan aikaan johtava pinta. Yhtenäisyys toteutuu, kun painojäljessä ei ole rakoja, jotka haittaavat johtavuutta. Painojäljestä tavoitellaan täten tasaista ja sen kerrospaksuudesta riittävää. Painoväriin painettavuuden lisäksi sen tulee olla hyvin johtavaa. Metalleista joitakin on otettu jo käyttöön painotekniikoissa kolloidisten liuosten muodossa, jolloin niillä on paras levittyvyys. Kolloidinen liuos on heterogeeninen liuos, johon on levitetty kiinteitä partikkeleita tai nestepisaroita. Metalliliuosten ominaisuuksia on muokattu sopiviksi painotekniikoille pinta-aktiivisilla aineilla ja lisäaineilla. [31, s. 3165; 33, s. 49.]

Tutkijat ovat valinneet metalleista useimmiten hopean, jota käytetään pastoina ja liuoksina. Sen fyysiset ja elektroniset ominaisuudet ovat hyviä muovimateriaaleilla. Se tosin on arvometalli, joten sitä ei voida korkean hinnan takia käyttää edullisissa, taipuisissa elektroniikoissa suuressa mittakaavassa. Hopean lisäksi tutkimusta on tehty ainakin kuparille, kullalle, alumiinille ja hiilelle. Kuparissa ongelmana on sen hapettuminen painamisen jälkeen. Hopeaa, kuparia ja hiiltä on käytetty myös nanomittakaavassa, sillä se

tuo materiaaleille erityisiä ominaisuuksia, muun muassa sähkönjohtavuutta. Tyypillisesti epäorgaaniset materiaalit, joita käytetään elektroniikan painamiseen, ovat metallisten mikro- ja nanopartikkelien dispersioita, eli hopea-, kulta- ja kuparipartikkeleita lisätään kantavaan aineeseen. Näitä niin sanottuja metallipohjaisia johtavia painovärejä ja musteita käytetään jäykillä ja taipuisilla materiaaleilla painettujen antennien ja RFID-tagien sekä johtavien linjojen ja elektroniikkapiirien komponenttien valmistamiseen. [31, s. 3165; 34, s. 73; 35, s. 56.]

Orgaanisen elektroniikan valmistukseen on kehitelty polymeerejä ja pieniä molekyylejä. Nämä materiaalit tarjoavat etuja epäorgaanisiin materiaaleihin verrattuna: suurien pintojen peittäminen, prosessointi nestemäisenä, alhaisen lämpötilan prosessointi, rakenteellinen joustavuus ja kemiallisen muuntelun avulla tehty toiminnallisten ominaisuuksien muokkaaminen. [30, s. 23; 34, s. 76.]

Hiilinanoputkista on kehitelty vaihtoehtoa muille johtavien painovärien ja musteiden raaka-aineille, sillä ne suoriutuvat sähkönjohtavana materiaalina monenlaisissa sovelluksissa. Ne johtavat sähköä paremmin kuin esimerkiksi kupari. Hiilinanoputket ovat potentiaalisia edullisen massatuotannon materiaaleja, sillä ne ovat mekaanisesti joustavia. Putket ovat nanomittakaavan hiilirakenteita, joiden ainutlaatuisuus perustuu niiden atomien erityisen vahvaan sidokseen. Hiilinanoputket ovat suhteellisen uutta teknologiaa (löydetty 1991), joten teknologia pysyy kalliina vaihtoehtona, kunnes se kehittyy massatuotantoon ja sen tuotantovolyymit kasvavat. Hiilinanoputket ovat myös vaihtoehto indiumtinaoksidille (ITO), jota käytetään näyttötekniikoissa läpinäkyvyytensä takia. ITO on kallista, ja sitä valmistetaan hupenevasta luonnonvarasta, joten sille on löydettävä tulevaisuudessa vaihtoehtoja näiden teknologioiden materiaalina. [36.]

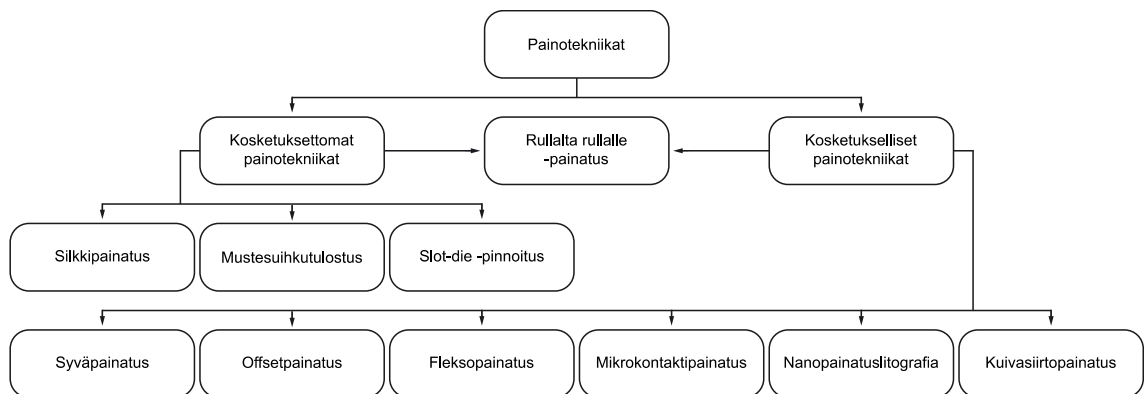
Nanoteknologiaan perustuvien tuotteiden tuotantoprosessi on lineaarinen: ensin valmistetaan nanoteknologiset raaka-aineet, kuten hiilinanoputket, jotka sitten jatkojalostetaan ja lopulta yhdistetään osaksi lopullista tuotetta tai sovellutusta. Esimerkiksi puolijohdevalmistuksessa tyypillinen tuotantoprosessi toimii kaksivaiheisesti: ensin valmistetaan ja asetetaan nanorakenteet substraatille, ja sitten materiaali jälkikäsitellään tai kuvioidaan. [33, s. 104.]

Polyeteeni (PE) on mainittu Kantolan ym. [33, s. 73.] julkaisussa "Printed Electronics, Now and Future" pohjamateriaalina, jolla voidaan hyödyntää monia liuotinpohjaisia or-

gaanisia ja epäorgaanisia painettavia materiaaleja. Painoprosessi asettaa monia haasteita pohjamateriaalille ja painettavalle materiaalille: materiaali tulee voida painaa alhaisessa lämpötilassa suurella läpimenolla, pohjamateriaalilla, painettavalla materiaalilla ja muilla kerroksilla tulee olla sopiva vuorovaikutus kastumisen, tarttumisen ja adheesiosuhteen, ja kuivamiskäytäntöjen tulee toimia. Kastuminen, tarttuminen ja adheesio tapahtuvat värin tai painetun elektronikan tapauksessa johtavan materiaalin siirrossa. Kastuminen ja tarttuminen tapahtuvat painettavan materiaalin osuessa pohjamateriaalille. Adheesio on nestettä kiinteällä pinnalla kiinnipitävä voima. [33, s. 73.; 32, s. 23.]

4.2 Painotekniikat

Kahdenlaiset tuotantotekniikat on todettu orgaanisen elektronikan valmistusprosesseissa hyödyllisiksi: kosketuksettomat päällystysmenetelmät ja kosketukselliset painotekniikat. Kosketuksettomista painotekniikoista mustesuihkutulostus on myös soveltuva tekniikka. Painotekniikat on luokiteltu kuvassa 7. Painaminen on kosketuksellinen tekniikka, kun taas päällystys on yleensä kosketukseton tekniikka. Päällystäminen tehdään 'kaatamalla' ainetta substraatille, joten se toimii paremmin eri viskositeeteilla ja on vähemmän herkkä pinnan muutoksille, toisin kuin pintaenergiaan perustuvat siirtotekniikat, joita yleisesti painotekniikat ovat. [37, s. 172, 182.]



Kuva 7. Orgaanisen elektronikan valmistukseen käytetyt painotekniikat luokiteltuna [31, s. 3164].

Kosketuksellisen painotekniikan prosessissa materiaali on kosketuksissa painavan pinnan kanssa, joka on painetun kuvion muotoinen. Kosketuksettomassa päällystämässä taas on kyse liuoksen levittämisestä aukeamien tai suuttimien kautta ennalta ohjelmoituun kuvioon liikuttamalla suutinta. Kosketuksettomiksi menetelmiksi voidaan luokitella

silkkipaino, slot-die (rakosuulake) -pinnoitus ja mustesuihkutulostus. Silkkipaino on luokiteltu tässä kosketuksettomaksi prosessiksi, sillä siinä ei ole varsinaisesti painavaa pintaa, vaan painoväri levitetään seulan aukkojen avulla. Perinteisiä kosketuksellisia painotekniikoita ovat syväpaino, offsetpaino ja fleksopaino. Kosketuksettomat menetöt ovat saaneet enemmän huomioarvoa, sillä ne ovat muuntautumiskykyisempiä kuin kosketukselliset painomenetelmät. Ne ovat helppoja, edullisia, nopeita, tuotantoprosessiin mukautuvia, vähentävät materiaalihukkaa, tuottavat suuren resoluution kuvioita ja ovat helposti ohjattavissa muutaman parametrin muutoksilla. Uusina menetelminä erityisesti taipuisalle elektroniikalle on kehitelty polymeerileimaukseen perustuvia painomenetelmiä, kuten nanopainatuslitografia, mikrokontaktipainaminen ja kuivasiirtopainatus. [31, 3164–3165.]

Yleisimmin painettujen sensorien valmistuksessa käytetyt painomenetelmät ovat silkkipaino, syväpaino ja mustesuihkutulostus, joiden hyödyt ja haasteet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Yleisimmät painettujen sensorien painomenetelmät [29, s. 8].

Painomenetelmä	Hyödyt	Haasteet
Silkkipaino	Suhteellisen edullinen Kehittynein R2R-yhteensopiva	Vaatii maskin Painoväriin hukka Rajoitettu resoluutio
Syväpaino	Soveltuu ohuille ja paksuille kalvoille Hyvä skaalautuvuus Korkea kerroslaatu Korkea resoluutio R2R-yhteensopiva	Sylinterit kalliita Vaativa tekniikka
Mustesuihkutulostus	Digitaalinen tekniikka (joustavuus) Korkea resoluutio R2R-yhteensopiva	Suuttimien tukkeutuminen

Yleisimpien sensorien valmistustekniikoiden, kuten spin coating (pyörimis) -pinnoituksen ja mustesuihkutulostuksen, ongelmia ovat hidas tuotantonopeus ja monikerroksisten rakenteiden kerrosten kohdistus. Spin coating valmistusprosessina tarvitsee lisäksi optisen litografian prosessivaiheita, jotka lisäävät valmistuskustannuksia. Silkkipainoprosessia voidaan tässä suhteessa pitää parempana. Sitä pidetään kypsempänä teknologiana, sillä sen prosessointiolosuhteet ovat vakaat sen pitkäaikaisen kehityksen tuloksena. Tekniikalle on löydetty materiaaleja, joilla on optimimaaliset fysikaaliset ja sähköiset ominaisuudet. [38, s. 2.]

Perinteisen silkkipainamisen hyödyntäminen elektroniikan komponenttien ja laitteiden valmistusprosesseissa mahdollistaa paksujen kerrosten painamisen pastamaisista materiaaleista. Sen muita hyötyjä ovat prosessin yksinkertaisuus, hyvä läpimeno ja automaation korkea aste esimerkiksi materiaalin alistus- ja luovutusvaiheissa sekä materiaalien (substraatit ja pastat) monipuolisuus. Lisäksi silkkipainamisen investointi- ja huoltokustannukset ovat suhteellisen alhaiset. Silkkipainettuja komponentteja voidaan myös leikata laserilla. Sen yksi suuri haaste tekniikkana on rajoitetun resoluution tuottaminen. [39, s. 11.]

Mustesuihkuprosessin soveltuvuutta painettuun elektroniikkaan on tutkittu paljon, ja toiminnallisia musteita on kehitetty yhä toimivammiksi. Mustesuihkuprosessilla on sen puutteista huolimatta mahdollista tulostaa kaikki olennaiset elektronisen komponentin osat: johtavat rakenteet, eristeet ja puolijohteet. Tekniikan etuina pidetään lisäävää eli additiivista valmistustapaa, digitaalisuutta ja kontaktittomuutta. Se vaatii toimiakseen kuitenkin nestemäisen musteen, joka saattaa olla haaste orgaanisia materiaaleja käytettäessä. Se ei nykyisellään ole tuotantomittakaavan prosessi, sillä kerrospaksuuden saavuttamiseksi vaaditaan usein useampi kerros painettavaa materiaalia. DuPont on kehittänyt nestemäisen musteen ongelmien ratkaisemiseksi kuivan prosessin, joka käyttää lämpökuvausta. Tekniikan kerrotaan mahdollistavan orgaanisten materiaalien kuviointi korkealla nopeudella ja hyvällä resoluutiolla. Prosessissa siirretään ohut, kiinteä metallikerros luovuttajakalvolta taipuisalle saajamateriaalille. Nämä kaksi taipuisaa kalvoa pidetään yhdessä alipaineen avulla. Lämpö tuotetaan laserilla, joka kohdistetaan luovuttajakalvon läpi metallikerrokseen. Laserin tuottama lämpö saa ympäröivät materiaalit muuttumaan kaasuiksi, joiden laajentuminen irrottaa luovuttajakalvon päällimmäisen kerroksen saajakalvolle. Kaikki johtavat polymeerit eivät kuitenkaan kestä prosessin tuottamaa lämpöä. [40; 30, s. 22–23.]

Syväpainolla on potentiaalia painetun elektroniikan valmistukseen. Tekniikkana se tuottaa hyvää laatua hyvällä jatkuvuudella. Sillä voidaan myös painaa erilaisia nesteitä. Syväpaine toimii sovellutuksiin, joissa painetaan pintaa peittäviä, tasapaksuisia alueita, mutta sen on vaikea suoriutua pienten elektroniikkarakenteiden yksityiskohtien toteuttamisesta. Syväpaine tarvitsee suhteellisen paljon painettavaa ainetta käydäkseen, joten tästä koituu investointikuluja. Ratajännityksen hallinta ja siitä seuraava kohdistuksen mahdollinen vaihtelu vaativat tarkkaa suunnittelua tekniikan soveltamiseen elektroniikan painamiseen. [42, s. 298.]

4.3 Kosketuksettomat päällystystekniikat

Kosketuksettomia päällystystekniikoita ovat esimerkiksi veitsipäällystys ja slot-die-pinoitus, jota voidaan pitää myös painotekniikkana. Päällystystekniikat ovat yleisesti kosketuksettomia tuotantotekniikoita, jotka päällystävät ajetun materiaalin homogeenisellä kerroksella. Verrattuna painotekniikoihin kerroksen paksuutta voidaan kontrolloida tarkasti. Tekniikat sopivat monelle eri viskositeetille, ja ne ovat vähemmän herkkiä, sillä materiaalin levitys ei ole riippuvainen herkistä pintaenergiariippuvaisista materiaalin kiinnittymisolosuhteista. [37, s. 182.]

4.4 Poistavat tuotantotekniikat

Painettuja metallipohjaisia materiaaleja käytetään additiivisessa eli lisäävässä painetun elektroniikan tuotantoprosessissa, jossa lisätään substraatille johtava materiaali esimerkiksi painamalla ja saadaan aikaan johtava kuviointi ja täten toiminnallisuus. Insinöörityössä esiteltävässä koetuotantoprosessissa on sen sijaan käytetty subtraktiivista eli poistavaa prosessia, jossa poistetaan materiaalista osia paljastaen johtavia osia raaputtamalla materiaalia tiettyyn syvyyteen. Molempia tuotantoprosesseja voidaan käyttää myös saman tuotteen tuotantoprosessissa tukemassa toisiaan. [4, s. vii.]

4.5 Laminointi

Sekä subtraktiivisessa että additiivisessa prosessissa yleensä päällystetään tuote sen jälkeen, kun johtava aihe on saatu valmistettua, sillä orgaaniset materiaalit ja erityisesti johtavat polymeerit tarvitsevat suojaa ympäristöltä. Laminointi tehdään yleensä laitteen vakauden varmistamiseksi ajan saatossa, mutta se myös suojaa kasattua tuotosta mekaaniselta rasitukselta. [37, s. 187.]

Kylmälaminointi toteutetaan paineherkällä liimapintaisella materiaalilla. Materiaalin tarttuvalla pinnalla on suojamateriaali, joka poistetaan ennen laminointia. Kaksi laminaattia, joiden välissä on laminoitavat laitteet, puristetaan yhteen nipissä. Ongelmana tässä on se, että saatetaan tarvita hyvinkin paksua materiaalia. Tarttuva materiaali itsessään

saattaa myös aiheuttaa käsittelyongelmia. Kylmälaminointi voidaan myös tehdä aktiivisen kerroksen yhdelle puolelle, mutta tämän on huomattu olevan lyhyempikestoisempi ratkaisu. [37, s. 187–188.]

Kuumalaminointi ei tarvitse suojakerrosta, sillä tarttuva pinta aktivoituu vasta kuumassa lämpötilassa, mikä tekee laminaatista helpommin käsiteltävää. Laminointi tehdään kahden kuumennetun telan välissä puristamalla. Liimapinta täten sulaa hetkellisesti, ja jäähtyessään se muodostaa tiiviin sinetin. Helpomman prosessin hallittavuuden lisäksi tekniikka mahdollistaa jopa 20 µm:n paksuisten sisempien laminointikerrosten käytön. [37, s. 188.]

UV-laminointi käyttää UV-herkkää liimapintaa. Materiaali yhdistetään toisen laminaatin kanssa nipissä, minkä jälkeen materiaali herkistetään UV-valolle. Tämä tekniikka on laminointitekniikoista monimutkaisin, sillä UV-herkkä liimapinta pitää erikseen lisätä laminaatille. Tämä tehdään yleensä fleksopainamalla. Monimutkaisuudesta huolimatta prosessi on hyvin toimiva ja liimapinnan paksuutta voidaan säädellä välillä 1–100 µm. [37, s. 188.]

4.6 Nopean tuotannon tekniikat

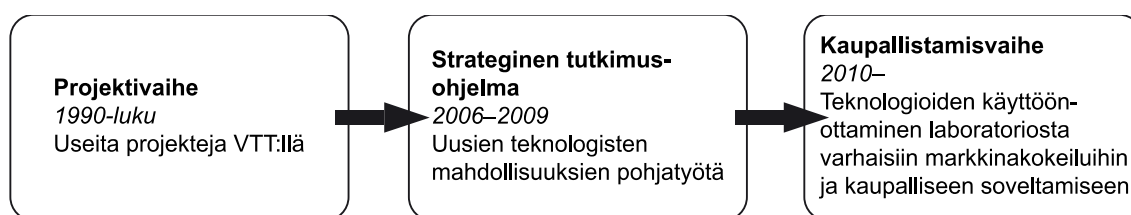
Useimmat taipuisat orgaanisen elektroniikan tuotteet ovat saavuttaneet kehityksessään vaiheen, jossa niiden tuotanto pitäisi laajentaa tutkimusympäristöstä nopeampaan tuotantoon. Rullalta rullalle -prosessi yhdistää korkean tuotantonopeuden ja halvat materiaalit. Jotkin tutkimusympäristön prosessit eivät sovellu suoraan nopean tuotannon rullalta rullalle -prosessiin. Esimerkiksi spin-coating ja metallievaporaatio ovat hyviä pienen mittakaavan tekniikoita, mutta ne eivät toimi suuremmassa mittakaavassa halpojen lopputuotteiden tuotantoprosesseina. Ne tarvitsevat myös yleensä suuria määriä myrkyllisiä liuottimia, joista aiheutuu ympäristöongelmien lisäksi suuria kustannuksia. [37, s. 171.]

Rullalta rullalle -tuotannon haasteina on nähty tekniikoiden adaptaatio toimimaan rullalta rullalle -prosesseissa, vaikkakin jotkut perinteiset painotekniikat toimivat lähtöjäänkin tässä tuotantotavassa. Kaikki edellisissä luvuissa tarkemmin esitetyt tuotantoprosessit, silkkipaino, mustesuihkutulostus, syväpaino, kontaktiton päällystys ja poistava tuotantotekniikka, toimivat rullalta rullalle -prosesseina. Toinen suuri haaste on indiumtinaoksidin

korvaaminen läpinäkyvänä elektrodina joustaville pinnoille. Teknisellä tasolla monikerroksisten tuotteiden kohdistus pitää saada toimimaan, muuten R2R-prosessi ei pääse hyödyntämään yhtä etuisuuttaan, korkeaa tuotantonopeutta. Myös pitkällä tähtäimellä ympäristönäkökohdat otetaan tekniikan kehityksessä huomioon, sillä liuotinpohjaiselle prosessille täytyy löytyä parempi vaihtoehto. Ne eivät lyhyellä tähtäimelläkään toimi luotettavasti suuressa tuotannossa. Elinkaari- ja kustannusanalyysillä voidaan pureutua näihin näkökohtiin kehityksessä. [37, s.191.]

Rullalta rullalle painetun elektroniikan etuina perinteiseen elektroniikkaan verrattuna ovat tulevaisuudessa suuret tuotantonopeudet ja saannot. Prosessien tulee kuitenkin alentaa valmistuskustannuksia huomattavasti kilpaillakseen perinteisen elektroniikan valmistuksen kanssa. R2R-tuotantolinjat kaikessa tehokkuudessaan saattavat olla vakiintuneiden toisiinsa liitettyjen osaprosessien takia yksipuolisia. Tällöin perinteisellä elektroniikalla on hyötynä erilliset tuotantoasemat, joiden avulla samassa tuotantolaitoksessa voidaan tuottaa erilaisia tuotteita. Samaan painetun elektroniikan R2R-tuotantolaitokseen täten oletettavasti rakennetaan useita tuotantolinjoja tai tuotantolinjojen painoyksiköt ovat vaihdettavia malleja. [42, s. 18; 43, s. 4.]

Rullalta rullalle -tekniikka on kasvamassa kaupalliseen tuotantoon. VTT:llä on organisaa- tion ja painetun älykkyyden kehitysasteleissa vuodesta 2010 eteenpäin ollut kaupallistamisen vaihe. Laboratoriosta siirrytään varhaisiin markkinakokeiluihin ja kaupalliseen adaptaatioon. [44, s. 12.] VTT:n painetun älyn kehitysasteet on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8. VTT:n kehitysasteet painetun älyn alalla [44, s. 12].

Jo vuonna 2012 VTT:llä oli Oulussa käytössään rullalta rullalle -tekniikan pilottitehdas, jossa oli neljä vaihdettavaa painoyksikköpaikkaa. Maksimi ratanopeus oli 30 metriä minuutissa ja maksimi rataleveys oli 300 mm. Nykyään pilottitehdas on laajentunut, ja se käsittää jo kaikki seuraavat tuotantomenetelmät:

- myötäsuuntainen syväpaino (forward gravure) ja käänteinen syväpaino (reverse gravure) kuvioituihin ohuisiin aktiivisiin materiaalikerroksiin
- fleksopaino kuvioituihin ohuisiin aktiivisiin materiaalikerroksiin
- silkipaino paksumpiin johtaviin ja eristäviin kerroksiin
- slot-die-pinnoitus yhtenäisiin materiaalikerroksiin
- lift-off metallikuviointiin (Ag, Al, Ca)
- ITO- ja metallietsaus (pasta ja märkä) ITO:n, alumiinin ja hopean kuviointiin PET/PEN (polyeteenitereftalaatti/polyeteeninaftalaatti) -materiaaleille
- stanssaus rei'ittämiseen ja leikkaukseen
- kuumapuristaminen mikrofluidisille kanaville ja koristeellisille yksityiskohdille
- laminointi suojakalvoilla kotelointiin ja liuotinlaminointiin mikrofluidisille si-ruille
- tyhjiöpäällystys ohuille metallikerroksille (Ag, Al, Ca)
- hiilidioksidilaserprosessointi muovin muotoiluun, rei'ittämiseen ja kanavointiin
- sähköinen testaus painettujen kerrosten resistanssimittaukseen
- komponenttikokoaminen painetuille hybridijärjestelmille
- päälleruiskuvalu muovien 3D-kokoonpanoille.

[44, s. 14; 45, s. 5–6.]

Tuotantotekniikat toimivat jo hyvin yksinkertaisille komponenteille, kuten sensoreille. VTT:n projektipäällikkö Tapio Ritvonen kertoo VTT:n sivuilla tutkimustuloksista rullalta rullalle -ylivalun valmistusprosessista, ja tulokset viittaavat siihen, että joustavalle kalvolle voidaan latoa komponentteja, jotka on helppo ylivalaa kestäviksi tuotteiksi. Tämä tarkoittaa käytännössä esimerkiksi sensorien painamista kalvolle, joka seuraavassa vaiheessa ladotaan tarvittavilla komponenteilla ja lopuksi ylivaletaan muovilla. [47.]

5 Kapasitiivisten sensoreiden älypainoprosessit

5.1 Mustesuihkuprosessi

Rullalta rullalle -menetelmää hyödyntäen mustesuihkutulostamalla joustavan, kapasitiivisen kosketussensorin valmistusprosessi voi olla esimerkiksi seuraavalla tavalla toteutettu, kuten se on esitetty 3M Innovative Properties Companyn patentissa: Rata kulkee usean prosessointiaseman kautta, joissa valmistusprosessi tapahtuu. Materiaali on läpinäkyvää 3–9 mm paksua PET-muovia, ja se voi kulkea asemien kautta yhden tai useamman kerran. Materiaalin ensimmäiselle puolelle asetetaan ohut, taipuisa, läpinäkyvä ja sähköä johtava kerros resistiivistä materiaalia, esimerkiksi indiumtinaoksidia. [47.]

Seuraavaksi materiaalille asetetaan ohuita, taipuisia elektrodeja, pinnejä ja johtavia alueita, jotka muodostavat yhteyden resistiivisen kerroksen kanssa. Tämä tapahtuu johtavan musteen avulla, joka on mieluiten hopeaepoksia. Päälle asetetaan vielä ohut suojaava kerros, joko ensimmäiselle kerrokselle tai materiaalin toiselle puolelle, riippuen sensorin konfiguraatiosta. Päällimmäiseksi tulee suojaava kerros, joka on hartsia. Se joko suihkutetaan tai painetaan muiden kerrosten päälle. Voidaan käyttää aineella päällystettyä telaa, kuten syväpainoprosessissa, mutta suihkutus on materiaalille hellävaraisempi tekniikka. Kerros voidaan saada aikaiseksi myös silkipainamalla, mutta siinä on havaittu enemmän tuotannollisia ongelmia kuin suihkuttamalla tai syväpainoprosessissa. [47.]

Lopuksi materiaaliin tehdään ohuita, pitkiä linjoja leikkaamalla ensimmäisen, tai ensimmäisen ja toisen kerroksen, läpi. Tällä eristetään pinnit johtavista alueista muutoin, paitsi kun pinnit yhdistyvät elektrodeihin. Leikkaus tehdään mieluiten laserilla. Koko materiaalin ja kerrosten läpi leikataan vielä lopuksi, jotta saadaan erotettua sensorit toisistaan. [47.]

5.2 Silkipainoprosessi

Christopher J. Milonen edullisen, silkipainetun kapasitiivisen nestetasoanturin patentissa valmistusprosessi on seuraava: Ohuelle, taipuisalle, eristävälle, rullalta ajettavalle materiaalille painetaan kaksi elektrodia, jotka muodostavat jatkuvan kapasitiivisen ku-

vion. Toinen samanlainen materiaali ajetaan yhteen ensimmäisen kanssa, jotta kapasitiivinen kuvio on sähköisesti eristetty. Päällimmäiseen materiaaliin voidaan painaa grafiikkaa. Materiaalien väliin voidaan ajaa vielä kaksipuolinen adhesiivinen kalvo tai kuumalla kiinnitettävä kalvo, jos on tarpeellista. Materiaalit sitten laminoidaan yhteen. Kapasitiivista kuviota ja graafista kuviota on painettu radansuuntaisena useita vierekkäin, jotta radasta voidaan lopulta leikata monta anturiliuskaa. Kapasitiivista kuviota voidaan leikata käyttötarkoituksen mukaan tiettyyn pituuteen. Sen toimintakyky luodaan tuottamalla puristusliitoksia, jotka yhdistävät kapasitiivisen kuvion johtimeen. Patentissa on mainittu käytettävän Crimpflex®-liittimiä, jotka on kehitetty taipuisille piireille. [48.]

Prosessi voidaan toteuttaa silkkipainamalla hopeaa 0,02539 mm:n paksuiselle PET-kalvolle, joka laminoidaan väliin tulevan PETg-kalvon (polyetyleenitereftalaattisykloheksaanidimetanoli) kanssa. Kapasitiivinen kuvio voitaisiin toteuttaa myös perinteisellä taipuisan, painetun piirilevyn tuotantoprosessilla, jolloin taipuisa kuparipäälysteinen materiaali syövytetään kemillisesti kapasitiivisen kuvion tuottamiseksi. [48.]

Nestetasoantureita tarvitaan eri pituisina, sillä niitä käytetään monenkokoisiin säiliöihin joko sisä- tai ulkopuolelle kiinnitettynä. Jos säiliö on metallinen, sensoria ei voida kiinnittää sen ulkopuolelle. Patentin valmistusprosessilla olisi mahdollista pitää minimaalista varastoa, sillä useanpituisia antureita ei tarvitsisi säilyttää varastossa, vaan ne voitaisiin tuottaa tilausten mukaan. [48.]

5.3 Syväpainoprosessi

Täysin rullalta rullalle syväpainettu hiilinanoputkipohjainen aktiivimatriisi on esitetty Leen ym. [49, s. 1–9.] tieteellisessä raportissa. Lee ym. ovat saaneet tuotettua 20 x 20 -aktiivimatriiseja (AM) perustuen yksiseinäisiin hiilinanoputkiin (single-wall carbon nanotube, SWCNT). Rullalta rullalle -syväpainoprosessissa on saatu tuotettua 9,3 ppi:n resoluutio. Käyttämällä hiilinanoputkien puolijohdekerroksena ja käyttämällä PET:ä pohjamateriaalina on saavutettu 98 %:n laitesaanto ja saatu poimittua avainskaalautusvuusnäkökohdat toteuttamiskelpoiseen tuotannolliseen rullalta rullalle -valmistusprosessiin. Aktiivimatriiseista saadaan monikosketussensoreita laminoimalla paineherkkä kumi hiilinanoputkesta valmistettuun ohutkalvotransistoriaktiivimatriisiin. Tässä rullalta rullalle -syväpainoprosessissa ei kohdata monikerroksisten tulostettujen sensorien kohdistustarkkuuden

ongelmaa eikä sensorin jännitteen kynnysarvon vaihtelun ongelmaa. Sensorin läheisyydessä oleva aine aiheuttaa sensorin magneettikentän muutoksen, ja kun muutos ylittää kynnysarvon, sensori ilmoittaa siitä havaitsijalle. Näiden ongelmien ratkaisu prosessilla mahdollistaa edistyneen, suuren suoritustehon valmistusteknologian, joka valmistaa taipuisia, kertakäyttöisiä ja ihmisen kanssa vuorovaikutteisia huipputeknologiaalaitteita, jotka pohjautuvat hiilinanoputki-ohutkalvotransistoriaktiivimatriiseihin. [49, s. 1–9; 50, s. 136.]

Leen ym. raportissa esitetty rullalta rullalle -painojärjestely on seuraava: Rainana toimii 15 metrin pituinen, 0,25 metrin levyinen 100 μm :n paksuinen PET, jonka ratanopeus on 8 m/min. Syväpainokoneessa on kaksi painoyksikköä, ja siinä on erikoisvalmisteinen servomekanismi, joka ohjaa painettujen kerrosten kohdistusta $\pm 20 \mu\text{m}$ kone- ja poikkisuunnassa. Kohdistusvirheitä havaitaan kolmella kameralla. Ensimmäinen kamera tunnistaa kohdistusmerkin ensimmäisessä painoyksiköstä, ja toinen kamera tunnistaa syväpainosylinterin kohdistusmerkin toisessa painoyksikössä. Kohdistusvirheiden sattumassa kohdistusmerkkien avulla lasketaan kohdistusvirheen suuruus kone- ja poikkisuunnissa. Virheet korjataan hidastamalla tai nopeuttamalla syväpainosylinterin rotaationopeutta sekä hienosäätämällä syväpainosylinterin poikittaissijaintia. Painokone sijaitsee ISO 14644-1 luokan 4 puhtastilassa, jossa saa olla enintään $10\,000 \geq 0,1 \mu\text{m}$:n hiukkasta m^3 :ssä ilmaa ja jossa kosteus- ja lämpötilatasot on kontrolloitu $40 \pm 2 \%$:n ja $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$:n väleille. [49, s. 2–3, supplementary information figure S7.]

Ohutkalvotransistoripohjaisen aktiivimatriisin valmistukseen tarvitaan neljä painoyksikköä, joten tutkimusryhmä Lee ym. on käyttänyt kahta painoyksikköä siten, että ensin molemmilla yksiköillä painetaan yksi kerta, minkä jälkeen rulla takaisinkelataan ja painetaan uudestaan ja prosessi toistetaan. Ensimmäisellä ajolla ensimmäisellä yksiköllä painetaan metallikerros (hila-elektrodi, kontaktielektrodi ja syöttölinjat). Toisella yksiköllä painetaan dielektrinen eli eristävä kerros. Rulla kelataan takaisin, ja toisella painoyksiköllä painetaan hiilinanoputkikerros. Rulla kelataan uudestaan takaisin, ja viimeiseksi painetaan nielu- ja lähde-elektrodit. Ratanopeus pysyy kaiken painamisen osalta samana. Hila-elektrodien leveys on jätetty tarkoituksella suuremmaksi kuin muiden elektrodien, jotta vältetään kohdistusongelmilta. Kokonaisuudessaan 220 aktiivimatriisia painetaan 15 metrin PET-rullalle. Syväpainosylinterin yhdellä pyörähdyksellä voidaan valmistaa kuusi aktiivimatriisia. Skaalautusvuusnäkökohdat huomioon ottaen yhdeksän ohutkalvotran-

sistoria karakterisoitiin yhdelle aktiivimatriisille, ja prosessilla saatiin siis tuotettua yhteensä 400 monikosketusanturia. Suuren saannon takeeksi on määritelty eri painettujen osien oikeassa suhteessa oleva koko toisiinsa nähden. [49, s. 2–3; 51, s. 20.]

Radasta saadaan toimivia kosketusantureita, kun se laminoidaan vielä paineherkällä kumilla. PET-kalvoon leikataan neliön muotoisia 300 µm:n reikiä, jotka kohdistuvat lähdeelektrodien kanssa. Reiät täytetään PSR-kumilla (Pressure sensitive rubber). Kumi kohdistetaan optisen mikroskoopin avulla. Kuparifolioarkki lisätään kiinni kumiin mittausten väyläksi. [49, s. 5.]

5.4 Prosessi koetutannossa

5.4.1 Materiaalit

Insinööriyön koetuantoprosessissa käytettiin seuraavia materiaaleja:

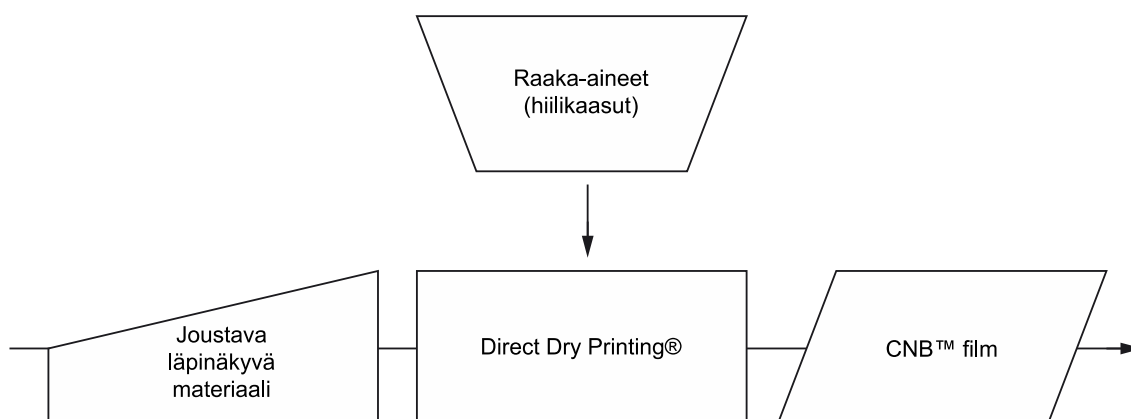
- CNB™ film -hiilinanoputkikalvo
- kopiopaperi
- laminointikalvo
- hopeaa sisältävä polymeeri
- kuumaliima.

Perusmateriaalina koetuantoprosessissa käytettiin Canatun läpinäkyvää CNB™ film -hiilinanomateriaalikalvoa. Kalvo on johtavaa, joustavaa ja läpinäkyvää. Sen sovelluskohteita ovat uudenlaiset, joustavat ja läpinäkyvät elektronikat, kuten kosketusherkät pinnat ja sensorit. [52.]

Canatu on Aalto-yliopistosta vuonna 2004 kasvanut yritys, joka perustettiin uuden keksinnön, hiilinanonupun, ympärille. Nanonuppu on yksiseinäisen hiilinanoputken (CNT) ja fullereenin hybridi, jolla on molempien rakenteiden hyvät ominaisuudet. Se on erittäin kestävä ja johtavaa materiaalia, joka muodostaa silti joustavia, venyviä ja läpinäkyviä tuotteita. Nanonupun toimivuus substraatilla ei ole riippuvainen nanonuppujen suuntauksesta, vaan ne voivat muodostaa hiilinanoputkia paremman sähkönjohtavuuden satunnaisella muodostumalla, sillä nanonuppujen pallomaiset fullereeniosat ovat erityisen hy-

viä elektrodien emittoimisessa. Tavallisten hiilinanoputkien ongelmana on, että ne katoavat johtavuutensa, jos niitä ei ole asetettu tietyllä tavalla. Hiilinanoputkien syntetisaatio vaatii lisäksi kalliita puhdistusprosessivaiheita, mutta nanonuput asetetaan yhdellä prosessivaiheella hiilipitoisista kaasusta substraatille, eivätkä ne tarvitse puhdistusta. Nämä seikat vaikuttavat hyvin paljon materiaalien valmistusprosessiin ja täten sovellutuksiin. Uusi materiaali voisi mahdollisesti korvata elektroniikan valmistetussa käytetyn kovan, hauraan indiumtinaoksidin, joka on kallista ja käyttää hyväkseen katoamassa olevaa alkuainetta. [53; 54; 55.]

Kalvo on valmistettu kuivapainamalla, joka on uusi valmistusmenetelmä. Se mahdollistaa nanonuppujen suoran sijoituksen oletetusti mille tahansa materiaalille jopa huoneenlämmössä. Valmistusprosessi on kuvattu kuvassa 9. Prosessia voidaan jatkaa arkki- tai rullalta rullalle -koneella käyttäen syväpaino-, silkipaino- ja fleksopainotekniikoita. Näin saadaan aikaan monimuotoisempia, monikerroksisia komponentteja. Canatun mukaan valmistustekniikka poistaa olemassa olevat pullonkaulatekijät hiilinanoteknologian kaupallistamisessa. [56.]



Kuva 9. Direct Dry Printing® -prosessi [56].

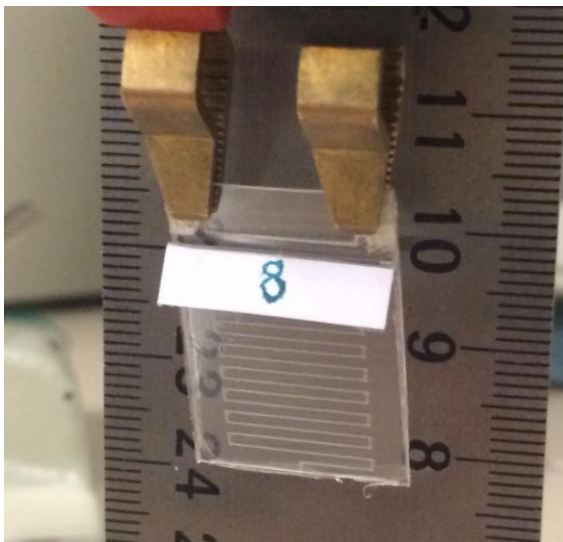
Direct Dry Printing® (DDP) käyttää yksinkertaisempaa valmistusprosessia kuin kilpailijansa, joten se on edullisempi tuotantoprosessi. Canatu sanoo tuotantotekniikan mahdollistavan korkealaatuisten, suuren suorituskyvyn tuotteiden valmistuksen. Canatu on kehittänyt ainutlaatuisen hiilinanonuppujen syntetisaatiomenetelmän, joka valmistaa puhtaita, niputtamattomia, suuren kiteisyyden hiilinanonuppua suoraan kaasumuodossa. DDP-prosessin yhdistäminen tähän syntetisaatiometodiin muodostaa yksinkertaisen, skaalautuvan, yksivaiheisen edullisten komponenttien tuotantoprosessin. [56.]

Perinteiset menetelmät yksiseinäisten hiilinanoputkien syntetisaatioon käyttävät esimuotoisia materiaaleja kontrolloimattomasti, joten prosessi on vaihteleva. Tämä aiheuttaa tuotoksen epähomogeenisuutta, alentaa saantoa ja tuottaa paljon epäpuhtauksia, jotka pitää poistaa monimutkaisilla puhdistusprosesseilla käyttämällä happoja, liuottimia ja tensidejä käyttökelpoisen materiaalin tuottamiseksi. [56.]

Canatu käyttää raaka-aineina hiiltä ja rautaa paineistetussa valmistusprosessissa. Nämä seikat alentavat kustannuksia. Myös muiden teollisten prosessien jäämät, kuten hiilidioksidi, metaani ja alkoholit, voidaan kierrättää ja hyödyntää nanomateriaalien valmistuksessa. Tämä tekee tuotantoprosessista ympäristöystävällisemmän. [56.]

5.4.2 Tuote

Itse tuotteena koetutannossa oli kuvassa 10 näkyvä kapasitiivinen sensori, jolla voidaan mitata muun muassa kosketusta ja kosteutta. Tuotteen perusmateriaali antaa sille sen ainutlaatuiset ominaisuudet, kuten joustavuuden ja läpinäkyvyyden. Painetun elektroniikan tutkimuksen alalla painettuja sensoreita on käsitelty paljon. Koetutantoprosessikehityksessä haluttiin testata uutta materiaalia ja prosesseja tähän tarkoitukseen. Kapasitiivisia sensoreita käytetään yleisesti niiden muihin sensoreihin verrattuna suuren herkkyyden ja pienen virrankulutuksen ansiosta. Nanonuppujen käyttöä vastaavalla tavalla ei ole tutkittu ennen Korobkinin ym. julkaisua ”Applied Research of Fabricating Flexible Thin Film Humidity Sensor Minimum Viable Product”. Esitetty koetutantoprosessi perustuu julkaisussa esitettyyn tutkimukseen ja on toisto julkaisussa esitetystä tuotantoprosessista. Prosessia jatkokehitettiin insinöörityössä toimivammaksi. [57, s. 1.]

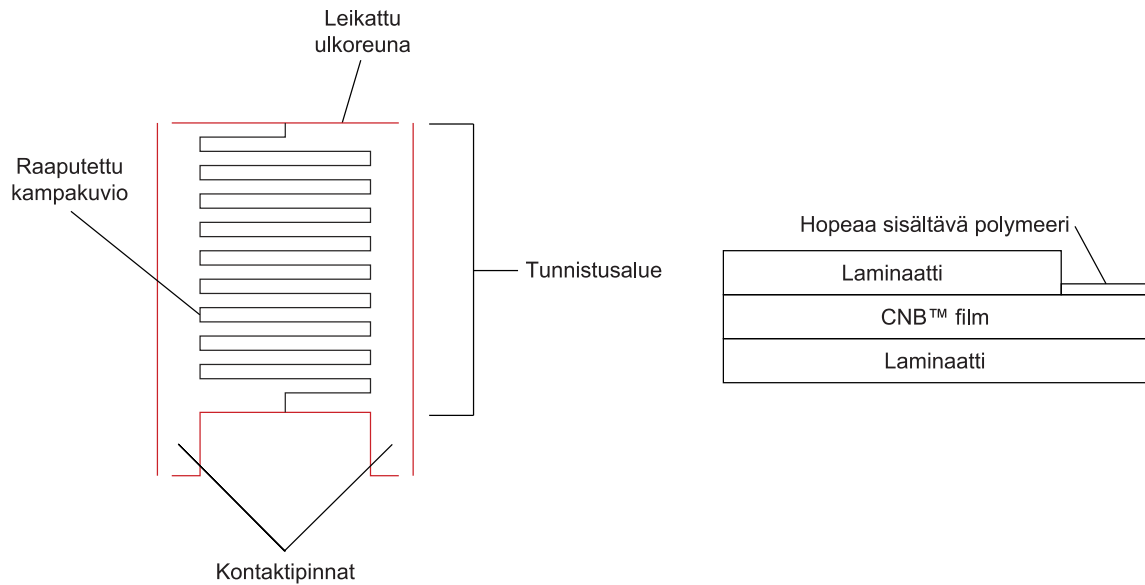


Kuva 10. Insinööriyön koetuotannossa valmistettu kapasitiivinen sensori.

Kapasitiivinen sensori ei tarvitse liikkuvia osia, toisin kuin resistiivinen sensori, joten se on edullisempi ja helpompi valmistaa. Kapasitiivisen sensorin valmistamiseksi perinteisesti lisätään resistiivinen päällystys eristetylle materiaalille. Yleensä tämä materiaali on lasia. Materiaalille sijoitetut elektrodit luovat sähkökentän päällystykselle. Elektrodeihin kiinnitetään havaintsija, joka monitoroi elektrodien läpi kulkevaa virtaa. Kosketus tai läheisyydessä oleva johtava kappale, kuten käyttäjän sormi, ja päällystemateriaali luovat kapasitiivisen kytkeytymisen. Näin pieni virta kulkee päällysteen ja elektrodien läpi. Kapasitiivinen kytkeytyminen kulkee käyttäjän ruumiin läpi maahan, jolloin virta kulkee havaintsijaan. [47.]

Kapasitiivinen sensori siis reagoi sen tunnistusalueella olevan magneettikentän alueella tapahtuviin dielektrisiin muutoksiin. Dielektrisyys tarkoittaa väliaineen aiheuttamaa muutosta sähkökenttään. Sensori toimii esimerkiksi kosketus- ja kosteussensorina. Kosteutta se havaitsee, sillä sensorin kapasitanssi on verrannollinen sensorin läheisyydessä olevan veden määrään ilman ja veden dielektristen vakioiden eron ansiosta. Sensorin on mahdollista havaita myös muiden materiaalien läpi. [48; 58.]

Sensorin rakenne ja toiminnalliset osat on havainnollistettu kuvassa 11.



Kuva 11. Koetuoatannossa valmistetun sensorin osat ja rakenne.

Sensorin rakenne ja osien merkitys tuotantoprosessissa on selitetty tarkemmin prosessikuvauksessa luvussa 7.4. Sensori on noin 20 x 28 mm:n kokoinen.

5.4.3 Laitteet ja ohjelmat

Koetuoatantoprosessissa käytettiin seuraavia laitteita:

- Epson Perfection 3200 Photo -skanneri
- iMac-työasema
- Graphtec Cutting Pro FC4510-60 -tasoleikkuri
- Linea DH-360 -pöytälaminoointikone
- giljotiinileikkuri
- sintrausuuni.

Näillä laitteilla saatiin kerralla tuotettua pieni määrä sensoreita ja selvitettyä, miten tuotantoprosessin tulisi toimia. Laitteet eivät sovellu kaupalliseen tuotantoon, sillä niillä tuotetaan sensoreita hyvin manuaalisesti ja pienissä erissä. Koetuoanto tapahtui graafisessa ympäristössä, jossa oli kaikki tarvittava sintrausuunia, materiaaleja ja työkaluja lukuun ottamatta. Se kuitenkin osoittautui toimivaksi tuotantoympäristöksi koetuoantoon, sillä siellä oli kuitenkin kaikki merkittävimmät tuotantoprosessin laitteet.

Lisäksi käytettiin seuraavia ohjelmia:

- Adobe Illustrator CC -vektorigrafiikkasovellus
- Mirage Print -RIP-ohjelmisto.

Leikkauskuvio suunniteltiin ja toteutettiin Adobe Illustrator CC -ohjelmalla, josta vektorikuvio saatiin vietyä sopivassa vektoritiedostomuodossa (.ai) tasoleikkurille. RIP-ohjelma Miragella sitten määritettiin leikkuu ja raaputuslinjat sekä terän nopeus ja paine.

5.4.4 Prosessikuvaus

Ennen tuotantoa sensorin muoto suunniteltiin siten, että se oli mahdollisimman toimiva kuvio sekä tuotannollisessa mielessä, että toimivuuden kannalta. Tuotettu kuvio oli kam-pakuvio, joita pystyttiin asemoimaan vierekkäin ja päällekkäin helposti, sillä sen ulkoreunat muodostavat tehokkaan suorakulmion.

Koetuantoprosessissa perusmateriaalina käytetty läpinäkyvä, johtava kalvo on arkki-muodossa. Arkit eivät olleet tasalaatuisia tiettyjen ominaisuuksien puolesta, sillä käytössä oli Canatun sovelluskehityskäyttöön tarjoamaa hukkamateriaalia. Arkit eivät olleet samankokoisia, eikä niiden vaihtelevan kokoinen johtava alue yltänyt arkin laidasta laidtaan. Täten jouduttiin tekemään ylimääräinen työvaihe, jota ei tarvitsisi tehdä, jos kyseessä olisi tasalaatuinen rullalta tuleva materiaali tai tasalaatuiset arkit. Arkit skannattiin tasoskannerilla, jotta leikkauskuvio saatiin asetettua kullekin arkille sopivaan kohtaan, johtavalle alueelle. Skannauksella aktiivinen alue saatiin näkyviin ja se voitiin tuoda pohjaksi leikkuulinjojen asemointiin. Leikkuulinjat eli sensorin muoto monistettiin aktiiviselle alueelle mahdollisimman tehokkaasti. Itse kalvoon tehtiin käsin merkinnät, joiden avulla arkki asetettiin asemointia vastaavassa suunnassa leikkuriin.

Leikkaus tehtiin automatisoidulla tasoleikkurilla, jolla pystyttiin tuottamaan tasalaatuinen leikkaus säätämällä terän nopeutta ja leikkuupainetta. Nämä parametrit saatiin säädettyä kokeilemalla, miten hyvin leikkuri leikkasi kalvomateriaalia eri asetuksilla. Tämä prosessivaihe pystytään helposti automatisoimaan, eikä sitä oletettavasti olisi tarvinnut koetuantonnossakaan tehdä joka kerta, jos kalvoja olisi leikattu monta peräkkäin.

Joka arkki leikattiin erikseen omilla leikkuulinjoillaan, mutta melkein joka arkille voitiin leikata yhtä monta sensorikuviota. Käytännössä tuotannossa oli yksi arkki kerrallaan.

Johtavasta kalvosta avattiin leikkaamalla materiaalia tiettyyn syvyyteen eli raaputettiin kampakuvio, joka altistaa hiilinanoputket ympäristölle materiaalin toiselta puolelta. Sensorikuvion ulkoreunat leikattiin osittain irti, mutta niihin jätettiin tukiosat, jotta ne eivät irtoaisi tässä vaiheessa ja ne olisi silti helppo leikata irti erillisiksi sensoreiksi myöhemmässä prosessivaiheessa. Leikkuuvaihe on leikkausta lukuun ottamatta hyvin tarkkuutta vaativa ja manuaalinen, sillä arkki piti asetella leikkuupöydälle sopivaan kohtaan, jotta asemointi ja leikkurin leikkuualue osuivat yhteen.

Sensorikuvioista piti jättää laminoimatta kaksi aluetta, jotka altistavat hiilinanoputket ympäristölle, jotta sensorista voidaan saada signaali. Ne suojattiin paperilla, jotta ne eivät mene umpeen laminoinnissa. Nämä aktiiviset alueet eli kontaktipinnat sijaitsivat sensorien ”jaloissa”, ja koska sensorit oli asemoitu vierekkäin riveihin, saatiin jalat suojattua paperiliuskoilla jokaisen sensoririvin kohdalla.

Laminointikoneen lämpenemisaika oli vähintään kymmenen minuuttia. Tämä käytännössä pitkitti prosessia, mutta prosessia optimoimalla voitaisiin koetutannossakin käyttää tämä aika hyödyksi, eikä se vaikuttaisi tuotteen valmistusaikaan. Laminointikoneen nopeutta pystyi säätämään, mutta koetutannossa nopeutta tärkeämpää oli laatu, joten prosessia ei tässä vaiheessa optimoitu ajallisesti.

Laminoinnin jälkeen sensorit leikattiin käsijalotiniinilla ulkoreunoista puhtaaksi, jolloin sensori oli periaatteessa valmis paperin poiston jälkeen, mutta käytettävyyden, toimivuuden ja kestävyys takia prosessi tarvitsi muutaman lisävaiheen. Sensorin kontaktipinnat päällystettiin hopeaa sisältävällä polymeerillä käyttäen CircuitWorks® Flex Conductive Pen -kynää, joka on tarkoitettu joustavien kytkentöjen nopeaan tuottamiseen. Tämä prosessivaihe suojaa kontaktipintojen hiilinanoputkia ympäristöltä ja varmistaa pintojen kestävyys käytössä. Hopeamateriaali ei ollut yhtä johtavaa kuin hiilinanoputkimateriaali. Tämä voidaan ottaa huomioon prosessin jatkokehityksessä.

Kynä aiheutti ongelmia tuotannossa, sillä sen mekanismi ei toiminut, vaan hopea jäi juumiin kynän kärkeen. Tämä vaaransi prosessin, jossa oli tarkoitus tuottaa suojaava kerros vahingoittamatta hiilinanomateriaalia, joten kynästä otettiin hopeamateriaali ruiskuun, josta sitä oli helpompi levittää. Hopeamateriaali oli tahmeaa, joten sen levittäminen parannetulla mekanismilla oli hankalaa, sillä se ei heti tarttunut perusmateriaaliin kovin hyvin. Tämän jälkeen sensorit laitettiin sintrausuuniin ensi kokeiluissa 60 °C:n lämpöti-

laan, mutta lopulta 80 °C:n lämpötilaan noin viideksitoista minuutiksi, jotta hopea kovettuisi. Täten kontaktipinnalle saatiin mahdollisimman hyvä johtavuus ja kestävyys. Hopeamateriaali olisi huoneenlämmössä kuivuessaankin kovettunut ja muodostanut toimintakykyisen pinnan, mutta sintrausuunin käyttö takasi maksimaalisen johtavuuden ja kestävyys.

Kontaktipinnoille eli kumpaankin sensorin jalkaan asetettiin molemmista päistä kuoritut asennusjohdot, jotka toimivat sensorin signaalijohtoina. Hopealla muodostettiin galvaaninen liitos hiilinanoputkien ja johtojen välille. Johdot kiinnitettiin kuumaliimalla. Asennusjohtojen valmistelu eli leikkaus, kuorinta ja taivuttelu vei jonkin verran aikaa, mutta tuotantoprosessia voidaan heti koetuoannosta pois siirtyessä parantaa käyttämällä valmiita komponentteja. Lopuksi sensorien reunat suljettiin kuumaliimalla, jotta kosteus ei vuoda sensorirakenteen sisälle ja vaikuta sensorin toimintaan.

Tuotantoprosessi kehittyi perusmateriaalin vaihtuessa tasalaatuisiin arkkeihin, sillä ylimääräinen prosessivaihe jäi pois; skannausta ei lopulta tarvinnut tehdä ollenkaan, sillä perusmateriaalin aktiivinen alue ulottui tarpeeksi pitkälle reunoille asti, jotta se ei vaikuttanut sensorien asemointiin. Ennen seuraavaa prosessivaihetta huomattiin, että sensoreista saatiin signaali myös ilman jalkoihin kiinnitettyjä johtoja, joten mittausvaiheeseen otetuissa sensoreissa ei enää ollut johtoja, vaan mittauspää kiinnitettiin suoraan sensorin kosketuspintoihin, jotka oli luotu hopeamateriaalilla. Hopealla luotu pinta suojaasi koetuantoprosessissa riittävästi altistettuja hiilinanoputkia ja tarjosi luotettavan kontaktipinnan useita mittauksia varten.

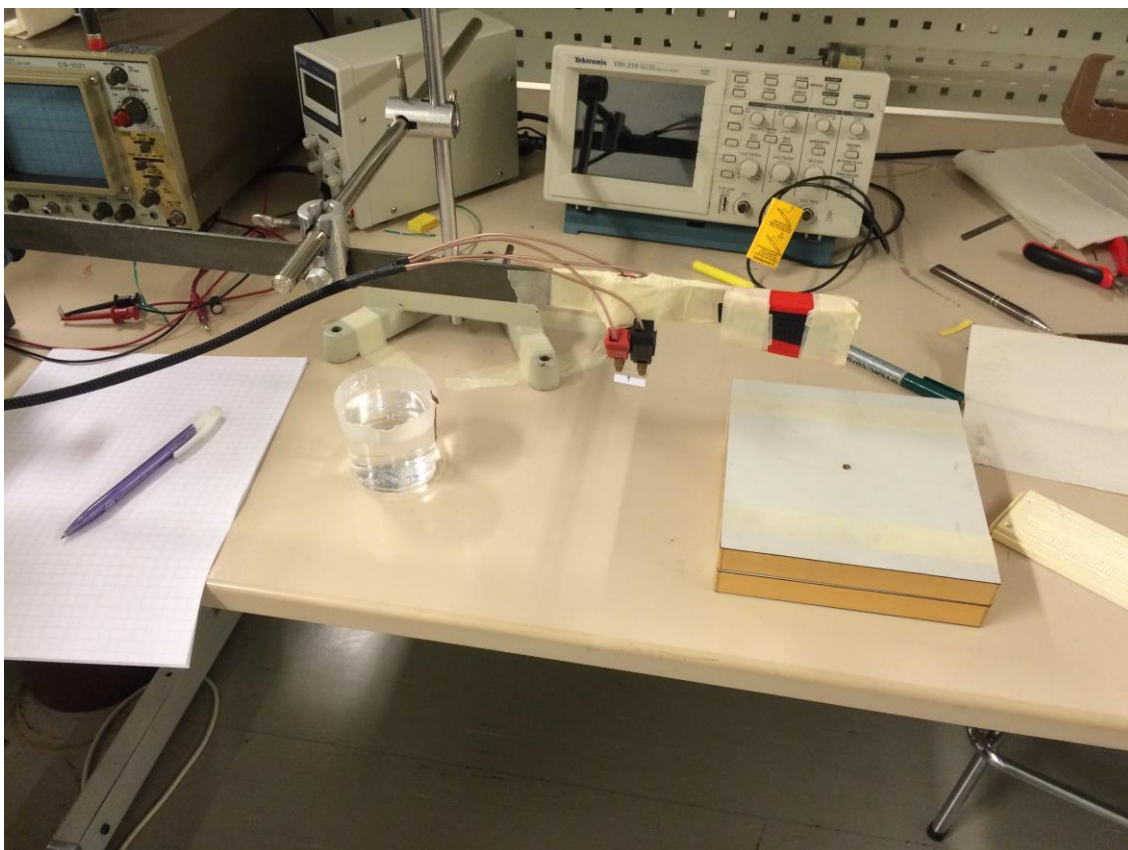
Valmiille sensoreille suoritettiin mittauksia, joissa selvitettiin sensorien toimivuutta ja laatuvariahtelua. Mittaustilanteessa käytettiin seuraavia välineitä:

- koetuantoprosessilla valmistettu sensori (20 kpl)
- CC2541 SimpleLink™ Bluetooth® Smart SensorTag -monisensorilaite (5 kpl)
- tukitankorakenne
- puulevy
- leipälevy
- maalarinteippi

- automaattinen RCL-mittari
- käsipaperi
- tislattu vesi
- muovimuki
- Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelma
- tussi.

Mittausolosuhteita valvottiin keräämällä tietoa ulkona vallitsevasta säästä kirjaamalla mittaustilanteissa sääaseman reaaliaikaiset säätiedot ylös sekä mittaamalla mittaushuoneen lämpötila- ja kosteusolosuhteita viidellä monisensorilaitteella, jotka oli sijoitettu ympäri huonetta. Näitä tietoja kerättiin mittaustulosten taustalle dokumentaatioksi, josta pystyttäisiin tarkistamaan mittaustuloksissa mahdollisesti esiintyviä poikkeamia. Yksi SensorTag (sensori 2) oli sijoitettu tukitankorakenteeseen, jolloin se mittasi mittaustilanteen olosuhteita. Sääolosuhteet ja mittaushuoneen olosuhteet on esitetty liitteessä 1. Taulukoissa esiintyvä sensori 1 oli sijoitettuna keskelle huonetta, sensori 3 oli sijoitettu huoneen perälle ja sensorit 4 ja 5 huoneen oville. Automaattisella LCR-mittarilla sensorista otettiin resistanssi- ja kapasitanssiarvot seuraavaksi esiteltävissä mittatilanteissa.

Mittaustilanne luotiin rakentamalla tukitankorakenteesta maalarinteipin avulla mittatilanne, joka näkyy kuvassa 12.



Kuva 12. Koetuantoprosessin mittausolosuhteet.

Mittaus toimi siten, että sensori ensin identifioitiin tussilla ja sitten asetettiin mittaustilaan kiinnittämällä se LCR-mittarin mittapäihin kosketuspinnostaan. Ensimmäinen mitta-arvo oli alustavien mittausten sensorin ollessa ilmassa, kuten näkyy kuvassa 12. Sensorin alle lisättiin puulevy ja leipälevy, joiden päälle laitettiin muovimuki, jossa oli tislattua vettä. Toinen mitta-arvo otettiin sensorin ollessa mukin ulkopuolella vedenpinnan alla. Kun leipälevy poistettiin, saatiin kolmas mitta-arvo, kun sensori oli ulkona puoliksi vedenpinnan alla. Samat kaksi mittausta toistettiin käänteisessä järjestyksessä siten, että ensin sensori oli mukin sisällä puoliksi vedenpinnan alla ja sitten sisällä kokonaan vedenpinnan alla. Tämän jälkeen sensori kuivattiin käsipaperilla ja otettiin väli-alustavien mittausten ilmassa. Sensorille tehtiin vielä kuiva- ja märkäpaperitestit, joissa sensorille kosketuksiin asetettiin käsipaperi kuivana ja märkänä.

Mittauksien seurauksena huomattiin kehityskohta sensorin tuotantoprosessiin sensorin käytettävyyden lisäämiseksi. Sensorista voitaisiin leikata jalkojen eli kosketuspintojen välinen alue pois, jotta mittauspäiden asettaminen helpottuisi. Myös levitetyn hopean epätasalaatuisuus vaikeutti mittapäiden asettelua.

Insinööriyössä suoritettussa koetuantoprosessissa mittaus tehtiin manuaalisesti, ja se vei hyvin paljon aikaa. Mittauksilla tutkittiin, oliko koetuantoprosessi tuottanut toimivia sensoreita, ja huomattiin yksittäisten sensorien tuotantovirheitä. Dataa pyrittiin keräämään paljon, jotta tuloksista voitaisiin nähdä mittaolosuhteiden vaikutus mittaustuloksiin ja saataisiin tietoa sensorien kapasitanssimuutosten suuruudesta. Mittaolosuhteet eivät olleet vakioita, sillä manuaalisella työllä oli mahdotonta suorittaa mittaukset aina samalla tavalla. Huomattiin, että esimerkiksi mittapäiden paikka vaikutti mittaustuloksiin. Myös esimerkiksi paperin asettaminen hieman eri tavalla ja sensorin epätäydellinen kuivaus vaikuttivat testituloksiin. Manuaalisesta työstä riippumattomat mittaolosuhteet kuitenkin pysyivät suhteellisen samanlaisina. Nämä olosuhteet on esitetty liitteessä 1.

Mittauksia tutkittaessa keskityttiin tarkastelemaan kapasitanssin muutoksia eikä sensorien erilaisia aliarvoja. Mittauksia ei laajemmin vahvistettu tekemällä niitä esimerkiksi olosuhdekaapissa. Mittauksissa huomattiin tuotantoprosessissa tapahtuneita virheitä, kuten hopean levityksen epätasaisuuden ja tarkkuuden sekä liimasinetöinnin virheet. Jos mittaoslukema ei tasoittunut, oli sensorin sinetöinnissä puutteita ja se keräsi kosteutta sisälleen. Kapasitanssimuutokset kuitenkin vahvistivat sensorien toimivuuden, sillä ne osoittivat, että mitä enemmän sensori oli kosketuksessa veden kanssa, sitä suurempi muutos oli.

Kokonaisuudessaan huomattiin, että pienissä erissä sensoreista oli mahdollista tehdä suhteellisen tasalaatuisia, jos niiden valmistaminen tehtiin huolellisesti ja siihen käytettiin paljon aikaa. Virheiden esiintyminen lisääntyi, mitä enemmän sensoreita tehtiin samassa ajassa. Liimauksen ja hopeoinnin prosessivaiheissa sensoreita valmistavan henkilön piti olla todella tarkka, sillä huolimattomalla työllä liimapintaan saattoi jäädä aukkoja. Hopean piti osua kontaktipinnoille, mutta se ei saanut osua niiden rajojen yli.

Koetuantoprosessi tuotti suhteellisen paljon toimivia sensoreita, joiden kalibroitavuudesta ei kuitenkaan ollut takuuta tässä vaiheessa tuotekehitystä. Sensoreista ei myöskään tehty mittauksia muuten taivutettuna, kuin mitä ne taipuivat mittauksien vaiheessa, jossa käytettiin kuivaa ja märkää käsipaperia mittatilanteen luomiseen. Toki tästä huomattiin, että mittaesarvo vaihteli riippuen paperin asennosta eli sensorin taipumisen asteesta.

5.4.5 Mittaustulokset

Arkki, joka tuotantoprosessia kehitettäessä tehtiin viimeiseksi ja josta tuotetut sensorit tehtiin valmiiksi, oli noin 175 x 265 mm:n kokoinen. Arkille mahtui kahdeksan seitsemän kappaleen riviä eli yhteensä 56 sensorikuviota. Sensoreista mittauksiin otettiin 20. Näitä sensoreita mitattiin kolmen päivän ajan, jotta saatiin seurattua, näyttivätkö sensorit samanlaista muutosta eri mittaustilanteissa eli toimivatko sensorit niiltä vaadittavalla tavalla.

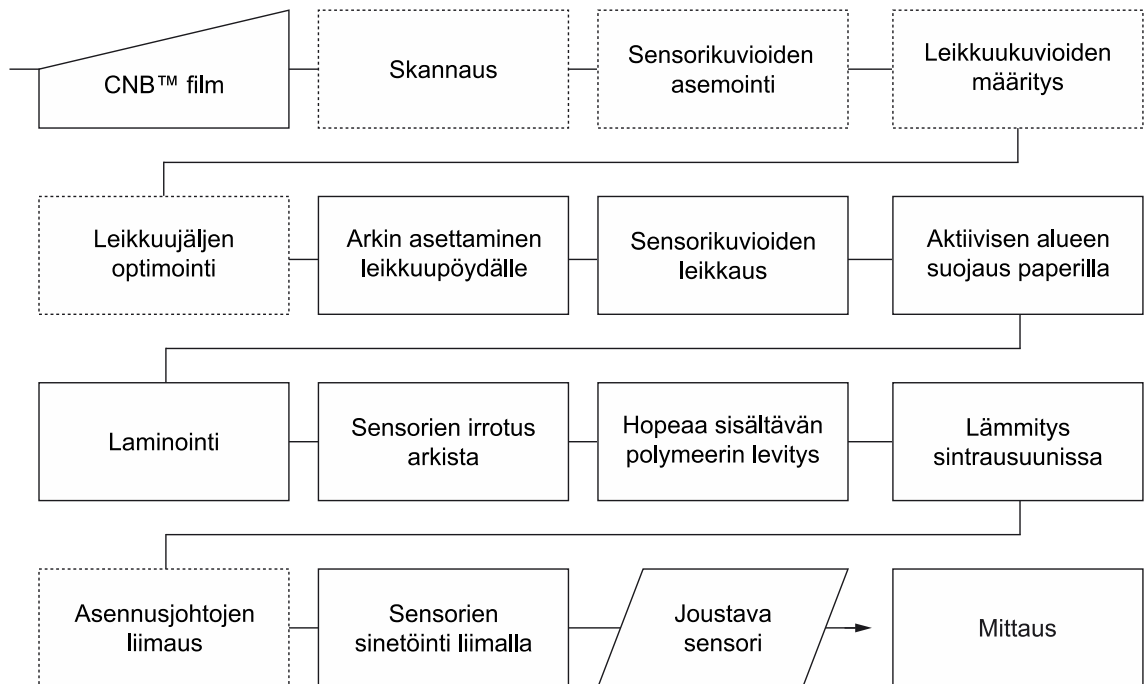
Mittaustulokset kerättiin taulukkoon, jonka avulla voitiin tehdä huomioita sensorin vakaudesta ajan kuluessa, sensorin herkkyydestä nesteeseen sekä sensorin herkkyydestä välittäjään (käsipaperi), joka on absorboinut tai adsorboinut nestettä. Taulukot on esitetty liitteessä 2. Taulukoista muodostettiin kuvaajat, joista voitiin tarkastella, pysyivätkö eri mittaustilanteiden väliset kapasitanssierot samassa suhteessa kolmen mittauspäivän ajan.

Suurin osa mitatuista sensoreista osoittautui toimiviksi. Kahdessa sensorissa yhden päivän mitta-arvo poikkesi huomattavasti muiden päivien mitta-arvoista ja kahdessa sensorissa yhden päivän mitta-arvo poikkesi jonkin verran muiden päivien mitta-arvoista. Sensorien vakaus ajan kuluessa todistettiin, kun initiaaliarvot pysyivät lähes kaikissa sensoreissa ja vain muutama arvo oli huomattavasti erilainen kolmantena mittauspäivänä. Kapasitanssin muutoksen suuruus eri mittaustilanteissa pysyi kuitenkin näissäkin sensoreissa asiallisena. Välittäjän aiheuttamat kapasitanssierot eivät pysyneet mittaustulosten perusteella sellaisessa suhteessa initiaaliarvoihin, että niistä olisi voitu tehdä johtopäätöksiä sensorin toimivuuden lisäksi laajemmin. Mittaustilanne aiheutti sensorin erias-teista taipumista, joka olisi pitänyt tehdä hallitusti, jotta joka mittauskerralla sensori olisi taipunut saman verran ja mittaustuloksia olisi voitu vertailla.

Tulosten varmistamiseksi mittausdataa ja dokumentaatiota olisi pitänyt kerätä enemmän. Kerätyn datan perusteella kaikki sensorit vaikuttivat olevan mahdollisesti toimivia, sillä datapisteiden lisääntyessä yksittäiset vaihtelut saattavat osoittautua yksittäisiksi virheiksi. Toki realistisesti tuotantoprosessin virheiden takia osa sensoreista olisi viallisia vähintään pidemmällä käytöllä. Jos erästä olisi mitattu kaikki sensorit, olisi voitu saada selville prosessin todellinen saanto. Olemassa olevilla tiedoilla prosessin saannosta olisi voitu vielä tehdä arvio hypergeometrisen todennäköisyysjakauman perusteella, jos viallisten tuotosten määrä määriteltäisiin tarkkaan.

5.4.6 Prosessikaavio

Koetuantoprosessin prosessikaavio on selvitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Insinööriössä toteutettu prosessi.

Kaavioon on merkitty katkoviivoilla prosessivaiheet, jotka jätettiin tai mahdollisesti olisi voitu jättää tekemättä tuotteen toimivuutta vaarantamatta, eli skannaus ja asennusjohtojen liimaus. Myös sensorikuvien aseointi, leikkuukuvien määrittäminen ja leikkuujäljen optimointi ovat katkoviivalla merkittyjä, sillä nämä prosessivaiheet eivät olleet välttämättömiä jokaisen arkin kohdalla, kun perusmateriaali oli tasalaatuista.

Varsinaisten tuotantoprosessivaiheiden jälkeen kaaviossa on merkittynä vielä mittaus, sillä se oli oleellinen osa koetuantoprosessia. Mittaamalla saatiin selvitettyä, toimiko koetuantoprosessi eli pystyikö se tuottamaan toimivan kapasitiivisen sensorin. Tuotantomittakaavassa mittaaminen on laadun varmistamiseksi tärkeää, jotta voidaan taata, että jokainen tuote toimii. Luvussa 6 tutkitaan selvitetyn koetuantoprosessin laajennusmahdollisuuksia.

6 Koetuotantoprosessin laajentaminen

6.1 Koetuotantoprosessin elinvoimaiset piirteet

Koetuotantoprosessissa ratkaistiin muutamia yleisten älypainamisprosessien ongelmia, joiden takia älypainotuotteiden tuotantoa on ollut vaikea skaalata massatuotantoon. Insinööriyössä esille tuotu tuotantoprosessi käyttää perusmateriaalina CNB™ film -hiilinanoputkikalvoa, jonka tuotantoprosessi itsessään valmistajan mukaan ratkaisee pullonkaulatekijöitä, joita hiilinanoteknologialla on ollut kaupallistumisen tiellä. Hiilinanoputkimateriaalien valmistusprosessin monimutkaisuus on saatu ratkaistua DDP-prosessin tuotantoinnovaatiolla: prosessissa voidaan siirtää hiilinanomateriaali suoraan substraatile, eikä epäkäytännöllistä ja myrkyllisiä aineita käyttävää puhdistusta tarvita. Prosessi-innovaation lisäksi hiilinanonuppu uutena keksintönä tuottaa varmemmin johtavaa, joustavaa ja läpinäkyvää materiaalia, joka mahdollistaa monenlaiset uudet sovellutukset. Hiilinanoputkien käyttö tuotteen sähkönjohtavuuden tekijänä mahdollistaa tulevaisuudessa nykyisiin materiaaleihin, kuten hopeaan ja ITO:iin, verrattaessa edullisen ja ympäristöystävällisen valmistusmateriaalin.

Koetuotantoprosessissa esitetty tuotantotapa poistaa liuotinprosessin ympäristö- ja tuotannollisia ongelmia, sillä tärkein tuotantoprosessivaihe on leikkaus ja perusmateriaali on hiilipohjainen. Pitkää ja ongelmallista kuivausvaihetta ei tarvita, eikä rakenteen valmistuksessa käytetä liuotinpohjaisia musteita. Myöskään monikerroksisten sensorien R2R-valmistuksessa ongelmaksi nouseva kohdistus ei ole oleellista, sillä tuotettu sensori on yksikerroksinen. Toki sensorien kontaktipintojen vahvistuksen prosessivaihe kohtaa mahdollisesti samoja ongelmia. [56.]

Kontaktipintojen vahvistukseen käytettiin koetuotantoprosessissa materiaalia, joka käytti yleisesti tutkittua ja olemassa olevissa prosesseissakin esitettyä, painetuissa elektronikoissa käytettyä metallia, hopeaa, johtavuuden tuottamiseen. Sen fyysiset ja elektroniset ominaisuudet on havaittu hyviksi muovimateriaaleilla. Hopea on arvometalli, joten se on väliaikainen ratkaisu kehittyvällä alalla, sillä tilalle täytyy löytää edullinen vaihtoehto tuotannon laajentuessa teolliseen tuotantoon. Pilottituotantoon sitä voidaan yleisesti kuitenkin käyttää, ja VTT käyttääkin sitä prosesseissaan. Hopeapartikkelien on edullista olla nanokoossa, sillä niillä on silloin suotuisia ominaisuuksia sovellukseen, kuten parempi

johtavuus ja alhaisempi sulamispiste. Alhaisempi sulamispiste mahdollistaa alhaisemman sintrauslämpötilan, joka taas mahdollistaa paperi- ja muovisubstraattien käytön. [59, s. 1360.]

6.2 Osaprosessien automatisointi

Laajennettu tuotantoprosessi rakennetaan teoreettisesti DDP-prosessin jatkeeksi. DDP-prosessi määritellään ensimmäiseksi tuotantovaiheeksi. Prosessin mallinnuksessa ei tällä kertaa oteta huomioon tuotteen pakkaus- ja toimitusvaiheita, sillä vaikka ne ovat välttämättömiä teollisessa tuotannossa, ne eivät vielä ole keskeisiä näkökohtia, kun keskitytään suuremman tuotantomäärän saavuttamiseksi käytettävien tuotantotekniikoiden löytämiseen. Koetuotantoprosessissa automatisoitavia prosessivaiheita ovat sensorikuvioiden leikkaus, kontaktipintojen alueen suojaus laminoinnilla, laminointi, sensorien irrotus arkista, kontaktipintojen vahvistaminen ja johtavuuden varmentaminen sekä sensorien sinetöinti. Sensorin toiminnan varmistaminen, eli laatumittaus, voidaan laskea myös välttämättömäksi tuotantoprosessivaiheeksi.

DDP-prosessia voidaan jatkaa rulla- tai arkkikoneilla. Kaikista tehokkain automatisointiratkaisu koetuotantoprosessin skaalaamiseksi olisi yksittäinen linjasto, joka prosessoisi suoraan perusmateriaalista joustavia sensoreita. CNB™-kalvoa tuotetaan A4- ja A3-kokoisina arkkeina sekä rullina 500 mm:n leveyteen asti. [60.]

R2R-prosessointia on pidetty yleisesti edullisen painetun elektroniikan suuren tuotantotehon ratkaisuna. Se saattaa ylittää arkkituotannon tuotantonopeudessa ja suoritustehossa, mutta ei välttämättä saannossa. Sen on ennustettu alentavan elektroniikan tuotantokustannuksia, kun se kehittyy massatuotantoasteelle. Arkkituotannossa arkkien käsittely saattaa viedä aikaa ja täten syödä tuotantotehoa, jos kaikkia prosessivaiheita ei pystytäkään toteuttamaan in-line, mutta toisaalta se tuo joustavuutta prosessiin saman seikan takia. R2R-prosessointi takaa jatkuvan tuotannon, jos in-line-prosessit ja ratajännite ovat kunnossa. R2R-prosessoinnissa kohdataan yleisesti esimerkiksi kohdistusongelmia, joita arkkisyöttöisessä prosessissa on huomattavasti vähemmän, mutta naukkarikinematikka pitää tuotantonopeuden jopa kolmasosassa rullasyöttöiseen prosessiin verrattuna. Yksikerroksisille sensoreille kohdistusongelmilla ei ole väliä itse sensorin valmistuksessa, mutta ongelma on suuri kontaktipintojen vahvistusvaiheessa. [61.]

Yksiselitteisesti kumpikaan tuotantotekniikka ei nouse ylivoimaiseksi koetuantoprosessin skaalaamisen tekniikaksi, mutta koetuantoprosessin luonteen takia kokonaan inline suoritettava prosessi vaikuttaa sopivammalta vaihtoehdolta. Myös suurin osa painetun elektronikan julkaisuissa esitetyistä tuotantoprosesseista käyttää R2R-prosessointia. Se on nähty avainprosessina painetun elektronikan nopeaan valmistukseen, joka taas osaltaan mahdollistaa tuotteiden alhaiset valmistuskustannukset ja alan kehittymisen teolliseen tuotantoon. [61.]

Leikkaus

Kaikista tärkein prosessivaihe eli sensorikuvioiden leikkaus vaatii leikkurin, joka raaputtaa materiaalia R2R-tuotannossa. R2R-tuotantoprosessia hyödyntävät leikkurit käyttävät leikkaustekniikoinaan esimerkiksi stanssausta ja laserleikkausta.

Laser tekniikkana on mainittu tutkituissa olemassa olevissa prosesseissa. Joustavia, orgaanisen elektronikan materiaaleja voidaan prosessoida lasertekniikalla. Lasereilla voidaan prosessoida suurella tarkkuudella materiaalin morfologisia, fyysisiä ja kemiallisia ominaisuuksia ilman mekaanista kontaktia. Delaporte ym. Aix-Marseillen yliopistosta pitävät tätä tekniikkaa yhtenä seuraavien vuosikymmenten tuotantoprosessien avainteknologiana. Laserprosessointi voi kohdentaa hyvin kontrolloituja määriä energiaa jopa kuutiomikrometrin kokoisille alueille. Standardi laserpiste on muutaman mikrometrin neliö, ja energia voidaan kohdistaa muutaman kymmenen nanometrin syvyyteen. Laser kohdistetaan materiaalille niin lyhyen pulssin ajan, että materiaali ei muutu ympäröiviltä kohdilta. [37, s. 285.]

Laserit ovat nykyään luotettavia tuotannossa, ja niitä voidaan käyttää suurissa läpimenoissa ja R2R-prosesseissa. Muokkaamalla laserin ominaisuuksia voidaan prosessia muovata paljonkin ja voidaan vastata orgaanisen elektronikan valmistuksen haasteisiin joustaville materiaaleille. Laserilla voi subtraktiivisen prosessin lisäksi tehdä additiivista tuotantoa. Laserilla voidaan tehdä leikkauksen ja raaputuksen lisäksi hitsausta, sintrausta, pintakuviointia ja porausta sekä pintapuhdistusta. Esimerkiksi pintapuhdistus ei toimi orgaaniselle elektronikalle perinteisillä menetelmillä, mekaanisella ja kemiallisella puhdistuksella. [37, s. 285–297.]

Laserprosessoinnin etuina nähdään digitaalisuus, kontaktittomuus, maskittomuus (suorakirjoituksessa), kuiva ja ympäristöystävällinen prosessointi, skaalautuvuus, nopeus

(riippuen halutusta resoluutiosta) ja R2R-yhteensopivuus. Se on silti suhteellisen kapealla alalla toimiva orgaanisen elektroniikan prosessointitekniikka. [37, s. 300.]

Kontaktipintojen peitto

Kontaktipintojen suojaamista laminoinnilla ei voida suuressa mittakaavassa toteuttaa lisäämällä paperia laminaatin väliin. R2R-prosessissa tämä vaihe voitaisiin mahdollisesti toteuttaa niin, että kontaktipintojen suojaava ja vahvistava materiaali sekä mahdolliset signaalijohteet laminoidaan tuotteen sisälle tai materiaalin laminoituminen estetään sen ominaisuuksien tai laminointiparametrien avulla. Tuotetta ei testattu kokonaan ilman kontaktipintojen peittävää materiaalia, mutta on mahdollista, että siitä olisi saatu silti signaali myös ilman kontaktipintojen lisäprosessointia. Käytetty hopea ei reagoanut perusmateriaalin kanssa, mutta mahdollisen korvaavan kontaktipintojen peittävän materiaalin valinnassa pitäisi ottaa tämä seikka huomioon.

Yksi tulevaisuudessa mahdollinen ratkaisu tähän voi olla johtava liima, joka toimii R2R-prosessissa ja korvaa tavallisesti käytetyt myrkylliset juotokset joustavassa elektroniikassa. Johtaville polymeereille on löydetty monia sovellutuksia, vaikka johtavaa liimaa polymeereistä ei ole vielä kehitetty. Sen kehittämiseen on paljon potentiaalia, sillä liimat on jo nyt usein tehty polymeereistä. Johtava liima voi mahdollistaa laminoinnin, joka yhdistää materiaalit sähköisesti ja mekaanisesti. [62, s. 359–360.]

Laminointi

Laminointi on yksi helpoimmista prosessivaiheista kasvattaa R2R-prosessiksi. Käytännössä yksinkertaisimmillaan tuotantoprosessin perusmateriaaliin lisätään rullalta laminaattimateriaali ja se yhdistetään esimerkiksi kuumalaminointiprosessilla. Koetuantoprosessin tuote toimii kosteussensorina ja tuotantoprosessi pyrkii tuottamaan pitkäaikaisia tuotteita, joten tuotteeseen laminoidaan molemmille puolille materiaali eli se kapseloidaan. Kapselointia tarvitaan pitkäaikaisen vakauden saavuttamiseksi, ettei kosteus pääse sensorirakenteen sisään. [37, s. 188.]

Muthappa Pohjanda-Madappa kokoaa Visveswaraiah Technological Universitylle tehdyssä opinnäytetyössään R2R-prosessin joustavan elektroniikan valmistukseen käytettäviä laminointitekniikoita. Hän esittää, että laminointi voidaan tehdä kuivalaminoinnilla

(liima levitetään materiaalille ja kuivataan uunissa), märkälaminoinnilla (liima on materiaaleja yhdistäessä yhä märkää), UV/EB-sintrauksella (ultavioletti/elektronisäde) ja kuumalaminoinnilla. [63, s. 95; 64.]

Kontaktipintojen vahvistaminen

Kontaktipintojen vahvistaminen ei välttämättä ollut tähdellinen osa koetuantoprosessia, mutta sensorin todellisessa soveltamisessa tuotteeksi se olisi oletettavasti toiminnallisuuden kannalta välttämätön prosessivaihe. Johtavan vahvikkeen lisäys voidaan toteuttaa jollain R2R-prosessiin sopivalla painoprosessilla. Tähän tarkoitukseen sopivia tekniikoita ovat esimerkiksi mustesuihkutulostus, silkipainatus ja syväpainatus. Perusmateriaalin valmistaja mainitsee tuotteen jatkojalostustekniikoissa näistä silkipainatuksen ja syväpainatuksen. [56.]

Sintraus on sensorin kontaktipintojen vahvistamisen toinen prosessivaihe. Se on yleisesti kuitenkin ollut R2R-prosesseissa haastava toteuttaa. Kokonaan mustesuihkutulostetun elektroniikan sintraus saattaa vaatia jopa yli 30 minuutin sintrauksen yli 250 asteen lämpötilassa, joten se ei sovellu kaikille materiaaleille ja se hidastaa läpiajoa. Laakso ym. VTT:llä ovat kehittäneet lasersintrausta painetuille nanopartikkelirakenteille. Sen on todettu olevan hyödyllinen tuotantotekniikka painetuille johtimille, kuten antennille, piireille ja sensoreille. Tutkimuksissa on tulostettu drop-on-demand-tulostuksella metallo-organisia nanohopeapartikkeleita joustavalle polyimidisubstraatille. Nanokokoisten hopeapartikkelien sulamispiste ja siten sintrauslämpötila alempi kuin tavallisen kokoisten hopeapartikkelien. Tämä lyhentää koko prosessin kestoa ja mahdollistaa muovisubstraatin käytön. Prosessi optimoitiin käyttämällä eri laserin tehotasoja, linjaerottelua ja useita toistoja. Laser on siis R2R-prosessilla toteutettavissa oleva sintrausmetodi. [59, s. 1360.]

Sensorien sinetöinti

Insinööriyön koetuantoprosessin laminointivaihe ei ollut teollisen mittakaavan prosessi, joten se loi laminoinnin, joka ei ollut tiivis ja joka piti sulkea liimalla. Mahdollisesti suuremmassa mittakaavassa laminointi on tiiviimpi, mutta sensorien toimivuuden takaamiseksi tuotteen sinetöinti on todennäköisesti tarpeellinen prosessivaihe. Joustava orgaaninen elektroniikka saattaa olla herkkää ympäristön, kuten veden ja hapen vaikutuksille, joten se saatetaan koteloida suojaaviin kalvoihin laserhitsauksen avulla. Laser sopii

varsinkin R2R-prosessointiin paremmin kuin monen kerroksen liittäminen liimapinnalla yhteen. Laajennettavan tuotantoprosessin tuote on kolmen kalvon yhdistelmä, jossa laminointikalvot sijoitetaan CNB™ film -hiilinanoputkikalvon ympärille. Tuotteiden reunat voidaan mahdollisesti laserilla hitsaamalla sinetöidä. [65, s. 218.]

Laaduntarkkailu

Laaduntarkkailu on tärkeä osa elektroniikan valmistusprosessia, sillä elektroniikkakomponentin toimivuus täytyy tarkistaa ennen toimitusta. Subbaraman ym. toteavat julkaisussaan ”Metrology and instrumentation challenges with high-rate, roll-to-roll manufacturing of flexible electronic systems”, että painetun elektroniikan menestys nojaa kolmeen tekijään: materiaaleihin, valmistusprosesseihin sekä tarkastukseen ja laadunvalvontaan. Materiaalien ja tuotantoprosessien kehityksessä on tapahtunut suurta kehitystä. Suuren nopeuden R2R-valmistuksessa tarkastus ja laadunvalvonta nähdään kriittisenä osa-alueena tuloksellisuuden saavuttamiseksi. Tähän kuuluu virheiden havaitseminen, pinnan karkeuden mittaaminen, pinnan laadun tarkkailu, sähköisten ominaisuuksien mittaus toimivuuden varmistamiseksi, kohdistuksen ohjaus, korjauksen mahdollisuus, tuotetestaus ynnä muita tekijöitä. Tuotekehityksessä, kuten insinööriyössä esitetyssä koetuotannossa, pääpaino on idean toteuttamiskelpoisuuden esittämisessä, ei laadunvalvonnassa. Pilottituotannossa se kuitenkin nousee suureen osaan, jotta voidaan tuottaa suuren nopeuden, läpimenon ja saannon prosessi. Siksi käytetään semiautomaattisia tai automaattisia laatutyökaluja. [66, s. 1–3.]

Laajennetussa prosessissa laaduntarkkailun tulee pystyä suoriutumaan nopeasta tuotantotahdista ja merkitsemään viallisia ja korjattavissa olevia sensoreita. Subbaraman ym. ovat kehittäneet tähän tarkoitukseen suurnopeuskameran, joka on yhdistetty kuvantunnistukseen. Julkaisussa todetaan, että prosessista tulee määritellä sopiva kuvaus- tahti, jotta voidaan pitää yllä korkeaa tuotantonopeutta, mutta samalla hyvää saantoa. [66, s. 7.]

Subbaraman ym. julkaisussa käsitellään vielä in-line-laaduntarkkailun haastetta, joka kohdataan elektroniikan valmistuksessa, sillä pelkkä optinen tarkastus ei riitä. Laaduntarkkailussa tulisi pystyä mittaamaan muun muassa resistanssia ja kapasitanssia, myös taivutettuina, jotta havaitaan virheet ja poikkeavuudet toimivuudessa. Tavallisia neulamittapäitä ei voida käyttää suurissa nopeuksissa, sillä ne naarmuttavat tuotteet. Uusia mittaratkaisuja, kuten rullan avulla toimivia ja joustavia mittapäitä, kaivataan. Jos tuote

saavuttaa toimivuutensa vasta tuotantoprosessin lopuksi, voidaan käyttää off-line-mittausta. Subbaraman ym. ovat tehneet tähän suunnitelman: rullalta leikattavat tuotteet siirtyvät linjalta kerääjään, jossa ne mitataan mittalaitteella, joka on levyn muotoinen. [66, s. 7.]

Perinteisesti parametrejä, kuten kalvojen ja johtimien ominaisuuksia, jotka vaikuttavat kriittisesti laatuun, voidaan kontrolloida ottamalla näytteitä, joista kuvataan 3D-topografia. Tämä kuitenkin vie paljon aikaa ja vaikuttaa uuden tuotteen tuotannon nostamiseen koeajosta massatuotantoon. Jos käytetään kalliita materiaaleja, kuten johtavia painovärejä tai musteita, mahdollistaa nopeampi prosessinohjaus materiaalikulujen säästöä. Focalspec tarjoaa ratkaisuna tähän reaaliaikaista topografiakuvausta suoraan tuotantolinjalle. Järjestelmä tutkii mikrofluidisia kanavia joustavalla materiaalilla ja tarkkaillee niiden muotoa ja syvyyttä reaaliajassa. Ensimmäinen tällainen järjestelmä asennettiin VTT:n MAXI R2R -pilottilinjalle Ouluun vuonna 2013, ja siellä on tehty havaintoja järjestelmän toimivuudesta. [67.]

Mittauksen lisäksi mittadataa keräävän ohjelmiston tulee osata erottaa vialliset ja toimivat tuotteet toisistaan. Prosessinkehityksessä täytyy määrittää sopivat kynnyksrajat tätä varten. [66, s. 7.]

Pilotointilinjasto

VTT:n pilottiympäristön tekniikoita voitaisiin käyttää tässä insinööriyössä esitetyn koetuotantoprosessin laajennetun prosessisuunnitelman pilotointiin. Tuotantoprosessisuunnitelmassa ei voida ottaa huomioon kaikkia mahdollisia tekijöitä, jotka vaikuttavat prosessiin, joten pilotointia tarvitaan tuotteen valmistusprosessin skaalauksen seuraavassa vaiheessa. Pilottiympäristössä tuotantoprosesseja ja tekniikoita voidaan kokeilla ilman kaupallisia ja teknisiä riskejä. Ympäristössä voidaan tehdä pilottituotantoa 250–320 mm:n radoilla ja 2–120 m/min -nopeudella kuudella erilaisella linjastolla. Monipuolisella pilotointilinjasto MAXIlla on tehty muun muassa tutkimusta painettavan pinnoitteen soveltumisesta massatuotantoon Oskari Mäkimartin opinnäytetyössä [69.] vuonna 2015. Siinä todettiin, että testeissä saatiin selville, että kehitettävät joustavan elektronikan materiaalit voidaan pinnoittaa, prosessoida, laminoida ja leikata tällä linjastolla. [68; 69, s. 3.]

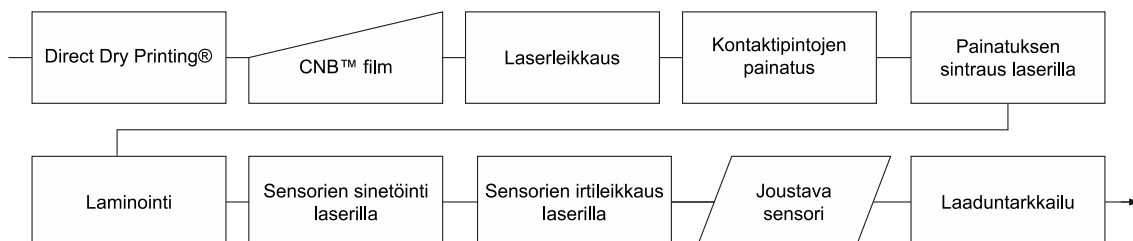
Jos verrataan pilottiympäristön tekniikoita selvitettyihin automatisaatiota vaativiin prosessivaiheisiin, voidaan nähdä, että pilottiympäristön tuotantotekniikoissa on tekniikat, joita tarvitaan insinööriyössä esitetyn tuotantoprosessin skaalaamiseen. Tärkein prosessivaihe, leikkaus, voidaan toteuttaa esimerkiksi hiilidioksidilaserilla leikaten. Myös muut lasertekniikat ovat mahdollisia. Hiilinanoputkirakenteiden vaikutusta hiilidioksidilaserleikkaukseen ja laserleikkauksen mahdollisuuksia polymeerimateriaaleille ovat tutkineet esimerkiksi Choudhury & Shirley [71.]: ”Laser cutting of polymer materials: An experimental investigation” ja Ghavidel ym. [72.]: ”Effect of carbon nanotubes on laser cutting of multi-walled carbon nanotubes/poly methyl methacrylate nanocomposites”. Näissä tutkimuksissa todettiin muun muassa, että polymeereillä on suhteellisen samanlainen leikkautuvuus ominaisuuksista huolimatta ja että tuotantonopeus ja hiilinanoputkien määrä vaikuttavat esimerkiksi alueeseen, johon laserprosessointi vaikuttaa leikkaamatta sitä. Näitä tutkimuksia voitaisiin jatkaa ennen pilottivaihetta, jotta saadaan selville valittujen tekniikoiden toimivuus skaalatussa prosessissa uudella materiaalilla (CNB™-kalvo). Canatu [73.] toteaa, että hiilinanonuppu-kosketussensorien kuivaprosessointiin tarvitaan todistettua pätevyyttä CNB™-kalvon laserkuviointiin. Canatulla on tähän Sensor Qualification Program, joka auttaa yhteistyökumppaneita tuottamaan sensoreita. [70, s. 11; 71; 72; 73.]

Kontaktipintojen prosessointi voidaan toteuttaa silkkipainatuksena tai syväpainatuksena, jotka voidaan molemmat tuottaa pilottiympäristössä. Painatus voidaan myös sinteroida esimerkiksi laserilla. Sinetöinnin, insinööriyössä tehdyn lähdetutkimuksen mukaan, pitäisi myös onnistua laserilla, jos sitä ylipäänsä tarvitaan laminoinnin lisäksi. [70.]

Coatema GmbH tuottaa päällystys-, painatus- ja laminointiratkaisuja muun muassa painetun elektroniikan alalle. Yritys sanoo keskittyvänsä räätälöityjen koneratkaisujen valmistamiseen, erityisesti R2R-prosessien skaalaamiseen, ja pystyvänsä potentiaalisesti skaalaamaan vaikeita prosesseja laboratoriosta teolliseen tuotantoon. Coatema on toimittanut ratkaisuja muun muassa joustavan elektroniikan valmistukseen. Esimerkiksi tämän yrityksen ratkaisuilla olisi myös mahdollista rakentaa tuotantoyksikkö insinööriyössä esitetylle tuotantoprosessille, sillä ratkaisujen joukossa on prosessissa vaadittavat tekniikat. [74.]

6.3 Prosessikaavio

Laajennetun tuotantoprosessin prosessikaavio on selvitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Insinööriyössä tehty prosessi laajennettuna suurempaan tuotantoon.

Prosessi alkaa materiaalintoimittajan DDP-kuivapainoprosessilla, joka tuottaa prosessissa käytetyn perusmateriaalin. Materiaalin prosessoiva tuotantolinja voidaan koota sopivista prosessointiyksiköistä, joita valmistaa esimerkiksi Coatema. Optimaalisessa tuotantolinjassa on laserprosessointiyksikkö tai yksiköitä, jotka leikkaavat, raaputtavat, sint-raavat ja sinetöivät materiaalia. Käytettäväksi painotekniikaksi voi valikoitua esimerkiksi silkkipainatus, sillä se on luotettava painotekniikka R2R-prosessille ja se tuottaa paksun painokerroksen, joka toimii hyvin johteilla. Tässä prosessissa painotekniikan ei tarvitse tuottaa vaihtuvaa painojälkeä, joten maskien käyttö ei ole ongelmallista. Laaduntarkkailu voidaan toteuttaa valmiille sensoreille, joita mitataan esimerkiksi laattamaisella mittapäällä tai suoraan prosessista nopeuskameralla kuvaamalla, 3D-togografiaa kuvaamalla tai tulevaisuudessa rullan avulla tai taipuisina. Vialliset sensorit vielä merkataan automaattisesti ja kerätään tuotoksista pois.

7 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli tehdä selvitys älypainamisympäristön tuotantoprosessista ja suunnitella koeympäristöstä laajennetun mittakaavan tuotantoprosessi älypainotuotteen valmistukseen. Insinööriyössä selvitettiin koetuotantoprosessin avulla hiilinanonuppu-materiaalille tuotetun kapasitiivisen sensorin toteuttamiskelpoisuus ja mallinnettiin tämä prosessi. Lisäksi tutkittiin perinteistä elektroniikan valmistuksen prosessia sekä älypainamisprosessia vastaavien sovellutusten osalta. Koetuotantoprosessilla saatiin tuotettua toimiva tuote ja riittävä saanto. Prosessi oli toteuttamiskelpoinen koetuotanto-olosuh-

teissa. Prosessissa käytettyjä tekniikoita tutkittiin, ja niiden pohjalta muodostettiin laajennettuun tuotantoon tarkoitettu prosessimalli. Mahdolliset tuotantotekniikat esitettiin selvitysten pohjalta. Selvitys tehtiin insinööriyön laajuuden puitteissa keskittymällä muutamisiin hyvin aiheeseen perehtymisen myötä esille tulleisiin tekniikoihin, joita oli esitetty lupaaviksi vastaavien prosessien tuotantotekniikoiksi. Laajennettu prosessimalli on kuitenkin vain teoreettinen, sillä siitä puuttuu muun muassa tarkempi analyysi ja riskinarviointi vielä kokonaan.

Käytettyjen ja tavoitetuotantotekniikoiden ja materiaalien edukkuutta painetun elektronikan alalla saatiin selvitettyä, ja tämän lisäksi tuotiin esille näkökohtia, miksi tuotantoprosessi ei välttämättä ole valmis siirtymään massatuotantoon tuotantoprosessissa käytetyn hopean takia. Tutkimusta voisi jatkaa tutkimalla kontaktipintojen kestävyyttä ilman hopeaa tai etsimällä muita ratkaisuja kontaktipintojen käytettävyyden tuottamiseksi. Voitaisiin myös tutkia prosessin laajentuvuutta käytännössä toteuttamalla esitetyn laajennetun tuotantoprosessin pilotointiympäristössä sopivilla tekniikoilla ja mittaamalla toteutettua prosessia, jotta saataisiin selville sen tekniikoiden todellinen soveltuvuus ja tuottavuus.

Painettu äly on uusi innovatiivinen teknologia-ala, joten se on vielä kehitysvaiheessa. Insinööriyössä on esitetty älypainotuotteen toteuttamiskelpoisuus Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran toimipisteen resursseilla sekä mahdollinen laajennettu tuotantoprosessi alalle. Insinööriyö toi siis esille painetun älyn tuotantomahdollisuuksia. Painettua älyä pidetään mahdollisena painotuotteiden arvostusta ja markkina-arvoa lisäävänä tekijänä, ja esimerkiksi PrintoCent-keskuksen johtaja Ilkka Kaisto pitää painettua älyä mahdollisena Suomen teollisen tuotannon kasvuun nostajana.

Insinööriyössä esitetyt prosessimallit kuvaavat painetun älyn soveltuvuutta elektroniikkateollisuuteen, joka on suuressa osassa modernia teollisuutta ja joka taas tuottaa sovellutuksia enemmistöön nykyajan tuotteita. Prosessit mahdollisesti laajennettaessa vastaavat elektroniikkateollisuuden haasteisiin, kuten lyhyisiin tuotantojaksoihin ja edullisen elektroniikan valmistukseen. Työssä huomattiin, että perinteisen elektroniikan tuotantoprosessit sensorien valmistukseen ovat monimutkaisempia kuin vastaavat ja työssä esitetyt painetun tuotantotekniikan valmistusprosessit ja että rullalta rullalle -prosessointi on tapa tehdä tulevaisuuden elektroniikkaa sen hyötyjen takia. Tämä prosessointi tuottaa joustavaa elektroniikkaa. Myös työssä käytetyn materiaalin ja yleisesti hiilinanoputkimateriaalien käytön hyöty painetun elektroniikan sovelluksissa käsiteltiin, ja se esitettiin

vaihtoehtona perinteisesti käytetylle ja yhä ongelmallisemmalle indiumtinaoksidille joustavan elektroniikan valmistukseen. Koetuotantoprosessilla ja laajennetulla prosessilla voidaan vastata painetun elektroniikan haasteisiin, kuten materiaalien huonoihin ympäristövaikutuksiin ja kalleuteen sen käyttämien tuotantotekniikoiden ja perusmateriaalin vuoksi.

Lähteet

- 1 Martinsuo, Miia & Blomqvist Marja. 2010. Prosessien mallintaminen osana toiminnan kehittämistä. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto Teknis-taloudellinen tiedekunta.
- 2 Tingander, Tuomo. 2010. Painettava elektroniikka tuotantotekniikkana. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 3 Pentinpuro, Esko. 2014. Kuumapuristusyksikön vaihtoehtoiset lämmitysratkaisut. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu.
- 4 Cantatore, Eugenio (ed.). 2013. Applications of Organic and Printed Electronics: A Technology-Enabled Revolution. New York: Springer Science+Business Media.
- 5 Printed electronics: The challenge of Systems Integration. 2016. Verkkodokumentti. International Electrotechnical Commission e-tech. <<http://iecetech.org/issue/2016-01/Printed-electronics>>. Luettu 24.3.2017.
- 6 TC 119 Scope. 2016. Verkkodokumentti. International Electrotechnical Commission. <http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:8679,25>. Luettu 17.3.2016.
- 7 Suganuma, Katsuaki. 2014. Introduction to Printed Electronics. New York: Springer Science+Business Media.
- 8 Taipale-Lehto, Ulla & Bergman, Timo. 2013. Graafisen teollisuuden osaamistarveraportti. Helsinki: Opetushallitus.
- 9 Lämsä, Markku, Heino, Markku & Vara, Vilja. 2014. Tekes Functional Materials Programme 2007–2013: Sustainable material solutions – From Finnish research to global business. Helsinki: Tekes.
- 10 Hecker, Klaus (ed.). 2016. Organic and Printed Electronics: Summary – OE-A Roadmap. Sixth Edition. Frankfurt am Main: OE-A & VDMA – The German Engineering Federation.
- 11 The Organic and Printed Electronics Industry expects an increase of 11 percent in sales revenue in 2016. 2016. Verkkodokumentti. OE-A. <<http://www.o-e-a.org/article/-/articleview/300135>>. 5.4.2016. Luettu 8.4.2016.
- 12 Älyelektroniikasta kestävä, joustava ja toiminnallista uudella teknologialla. 2016. Verkkodokumentti. VTT. <<http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/%C3%A4lyelektroniikasta-kest%C3%A4v%C3%A4-joustavaa-ja-toiminnallista-uudella-teknologialla>>. 11.1.2016. Luettu 8.4.2016.

- 13 Printocent-innovaatiokeskus: huippututkimustuloksista merkittävää liiketoimintaa. 2009. Verkkodokumentti. VTT. <<http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/printocent-innovaatiokeskus-huippututkimustuloksista-merkitt%C3%A4v%C3%A4%C3%A4-liiketoimintaa>>. 13.1.2009. Luettu 11.4.2016.
- 14 Bogdănoiu, Cristiana. Business process reengineering method versus Kaizen method. Spiru Haret University.
- 15 Laamanen, Kai. 2005. Johda suorituskyyä tiedon avulla – ilmiöstä tulkintaan. Helsinki: Suomen Laatu keskus.
- 16 Laamanen, Kai & Tinnilä, Markku. 2009. Prosessijohtamisen käsitteet: Terms and concepts of business process management. 4., uudistettu painos. Helsinki: Teknologia info Teknova.
- 17 Jeston, John & Nelis, Johan. 2008. Business Process Management: Practical Guidelines to Successful Implementations. Second Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- 18 Information Resources Management Association. 2016. Project Management: Concepts, Methodologies, Tools and Applications. Hershey: Business Science Reference (an imprint of IGI Global).
- 19 Web Services Glossary. Verkkodokumentti. W3C. <<http://www.w3.org/TR/2004/NOTE-ws-gloss-20040211/>>. 11.2.2004. Luettu 3.1.2017.
- 20 vom Brocke, Jan & Rosemann, Michael (eds.). 2015. Handbook on Business Process Management 1: Introduction, Methods and Information Systems. Second Edition. New York: Springer.
- 21 Monk, Ellen & Wagner, Bret. 2013. Concepts in Enterprise Resource Planning. Fourth Edition. Hampshire: Cengage Learning.
- 22 Basic Flowchart Symbols and Meaning. Verkkodokumentti. ConceptDraw. <<http://www.conceptdraw.com/How-To-Guide/flowchart-symbols>>. Luettu 25.3.2017.
- 23 Lecklin, Olli. 2006. Laatu yrityksen menestystekijänä. Helsinki: Talentum.
- 24 Davenport, Thomas H. 1993. Process Innovation: Reengineering Work through Information Technology. Boston: Harvard Business School Press.
- 25 Ala-Krekola, Wilhelm. 2015. Liiketoimintaprosessien analysointi – Avainsuoritusindikaattorit analytiikan tukena. Kandidaatin tutkielma. Jyväskylän yliopisto.

- 26 Oakland, John, 2008. Statistical Process Control. Sixth Edition. London and New York: Routledge.
- 27 Smed, Jouni, Johnsson, Mika, Johtela, Tommi & Nevalainen, Olli. 1999. Techniques and Applications of Production Planning in Electronics Manufacturing Systems. TUCS Technical Report No 320. Turku Centre for Computer Science.
- 28 Daniel, Jurgen. 2010. Verkkodokumentti. Printed Electronics: Technologies, Challenges and Applications. International Workshop on Flexible and Printed Electronics. <<https://www.parc.com/content/attachments/printed-electronics-technologies.pdf>>. Luettu 11.4.2016.
- 29 Fabritius, Tapio. 2012. Coatings in printed sensors. Verkkodokumentti. Sixth Mikeli International Industrial Coating seminar. <<http://www.miics.net/archive/get-file.php?file=215>>. Luettu 3.1.2017.
- 30 Klauk, Hagen (ed.). 2006. Organic electronics: Materials, Manufacturing and Applications. Weinheim: WILEY-VCH Verlag & Co.
- 31 Khan, Saleem, Lorenzelli, Leandro & Dahiya, Ravinder S. 2015. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. IEEE Sensors Journal, Vol. 15, No. 6, s. 3164–3185.
- 32 Spännäri, Toni, Ristimäki, Seija & Viluksela, Pentti. 2010. Painoviestinnän tekniikka. Helsinki: Opetushallitus.
- 33 Jones, Richard A. L. 2002. Soft Condensed Matter. New York: Oxford University Press.
- 34 Neuvo, Yrjö & Ylönen, Sami (eds.). 2009. Bit Bang: Rays to the Future. Helsinki: Helsinki University Print.
- 35 Cui, Zheng. 2016. Printed Electronics: Materials, Technologies and Applications. Singapore: John Wiley & Sons Singapore.
- 36 CNT Technology Overview. 2017. Verkkodokumentti. NanoScience Instruments. <<http://www.nanoscience.com/applications/education/overview/cnt-technology-overview/>>. Luettu 22.3.2017.
- 37 Logothetidis, Stregios (ed.). 2015. Handbook of Flexible Organic Electronics: Materials, Manufacturing and Applications. Cambridge: Elsevier.
- 38 Khan, Saleem, Dang, Wenting, Lorenzelli, Leandro & Dahiya, Ravinder. Flexible Pressure Sensors based on Screen-Printed P(VDF-TrFE) and P(VDF-TrFE)/MWCNTs. University of Trento, Fondazione Bruno Kessler & University of Glasgow.

- 39 Prudenziati, Maria & Hormadaly, Jacob (eds.). 2012. Printed films: Material science and applications in sensors, electronics and photonics. New Delhi: Woodhead Publishing.
- 40 Kemiläinen, Marjut. 2013. Mustesuihkutekniikasta apua elektroniikan valmistukseen. Verkkodokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.tut.fi/fi/tieto-yliopistosta/uutiset-ja-tapahtumat/vaitostiedotteet/mustesuihkutekniikasta-apua-elektroniikan-valmistukseen-p056985c2>>. 26.11.2013. Luettu 20.3.2017.
- 41 Gamota, Daniel, Brazis, Paul, Kalyanasundaram, Krisna & Zhang, Jie (eds.). 2004. Printed Organic Molecular Electronics. New York: Springer Science+Business Media.
- 42 Schwartz, Evan. 2006. Roll to roll Processing for Flexible Electronics. Cornell University.
- 43 Watts, Michael P. C. Advances in roll to roll processing. Verkkodokumentti. Impattern Solutions. <<http://www.impattern.com/Download/RollToRollProcessing.pdf>>. Luettu 31.3.2017.
- 44 Karioja, Pentti et al. 2012. Printed Hybrid Systems. Verkkodokumentti. VTT Technical Research Centre of Finland. <http://www.vtt.fi/files/newsletter/os/022012/printed_hybrid_systems.pdf>. 14.3.2012. Luettu 8.4.2016.
- 45 Printed electronics pilot manufacturing environment: Create next generation electronic products today. 2015. Verkkodokumentti. VTT. <http://www.vtt.fi/Documents/Liiketoiminnan%20kehitt%C3%A4minen/VTT_Printed%20electronics%20pilot%20manufacturing%20environment_Sales%20presentation.pdf>. 11.4.2015. Luettu 15.3.2017.
- 46 Älyelektroniikasta kestävä, joustava ja toiminnallista uudella teknologialla. 2016. Verkkodokumentti. VTT. <<http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/%C3%A4lyelektroniikasta-kest%C3%A4v%C3%A4-joustava-ja-toiminnallista-uudella-teknologialla>>. 11.1.2016. Luettu 15.4.2016.
- 47 Shultz, Stephen C., Chernefsky, Anthony F. & Geaghan, Bernard. 2004. Flexible capacitive touch sensor. 3M Innovative Properties Company. US 6819316 B2.
- 48 Milone, Christopher J. 2015. Low cost capacitive liquid level sensor. US 8966973 B1.
- 49 Lee, Wookyu, Koo, Kyunmo, Sun, Junfeng, Noh, Jinsoo, Kwon, Kye-si, YEom, Chiseon, Choi, Younchang, Choi, Chen, Kevin, Javey, Ali & Cho, Gyoujin. 2015. A fully roll-to-roll gravure-printed carbon nanotube-based active matrix for multi-touch sensors. Scientific Reports.
- 50 Hu, Fei & Cao, Xiaojun. 2010. Wireless Sensor Networks: Principles and Practice. Boca Raton, London and New York: Taylor & Francis Group.

- 51 Kiramo, Elli-Noora. 2013. Teollisuuden puhdastilat. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- 52 CNB™ Films. Verkkodokumentti. Canatu. <<http://old.canatu.com/cnb-films/>>. Luettu 22.3.2017.
- 53 NanoBud®. Verkkodokumentti. Canatu. <<http://old.canatu.com/nanobud/>>. Luettu 22.3.2017.
- 54 Bullis, Kevin. 2014. "Nanobuds" Could Turn Almost Any Surface into a Touch Sensor. Verkkodokumentti. MIT Technology Review. <<https://www.technologyreview.com/s/532906/nanobuds-could-turn-almost-any-surface-into-a-touch-sensor/>>. 8.12.2014. Luettu 22.3.2017.
- 55 Vuoden suurin pääomasijoitus hiilinanomateriaalien ja kosketussensorien teollistamiseen. Verkkodokumentti. Tekes. <<https://www.tekes.fi/nyt/uutiset-2013/vuoden-suurin-paaomasijoitus-hiilinanomateriaalien-ja-kosketussensorien-teollistamiseen/>>. Luettu 22.3.2017.
- 56 Direct Dry Printing®. Verkkodokumentti. Canatu. <<http://old.canatu.com/direct-dry-printing/>>. Luettu 22.3.2017.
- 57 Korobkin, Maksim, Yin, Jiayuan & Klemetti, Aarne. Applied Research of Fabricating Flexible Thin Film Humidity Sensor Minimum Viable Product. Metropolia University of Applied Sciences.
- 58 Savolainen, Jari. Kapasitiiviset rajakytkimet. Verkkodokumentti. Metropolia wiki. <<https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/Kapasitiiviset>>. Luettu 20.3.2017.
- 59 Laakso, Petri, Ruotsalainen, Saara, Halonen, Eerik, Mäntysalo, Matti & Kemppainen, Antti. Sintering of Printed Nanoparticle Structures Using Laser Treatment. VTT Technical Research Centre of Finland, Lappeenranta, Tampere University of Technology, Institute of Electronics, VTT Technical Research Center of Finland, Oulu.
- 60 Canatu opens production facility in Finland. 2013. Verkkodokumentti. Canatu. <<http://old.canatu.com/canatu-opens-production-facility-in-finland/>>. 26.11.2013. Luettu 20.3.2017.
- 61 Willmann, Jürgen, Stocker, Daniel & Dörsam, Edgar. 2013. Characteristics and evaluation criteria of substrate-based manufacturing. Is roll-to-roll the best solution for printed electronics? Organic Electronics, Vol. 15, No. 7, s. 1631–1640.
- 62 Facchetti, Antonio & Marks, Tobin J. (eds.). 2010. Transparent Electronics: From Synthesis to Applications. West Sussex: John Wiley & Sons.

- 63 Ponjanda-Madappa, Muthappa. 2006. Roll to Roll Manufacturing of Flexible Electronics Devices. Thesis. Visveswaraiah Technological University.
- 64 Laminating process. Verkkodokumentti. Bobst. <<https://www.bobst.com/fien/products/laminating-flexible-materials/process/#.WN6MjDuGOUI>>. Luettu 25.3.2017.
- 65 Brosda, Maximillian, Dr. Olowinsky, Alexander & Pelzer, Alexander. 2016. Laser Encapsulation of Organic Electronics with Adapted Diode Lasers in Flexible Production Processes. Physics Procedia, Vol. 83, s. 218–224.
- 66 Subbaraman, Harish, Lin, Xiaohui, Xu, Xiaochuan, Dodabalapur, Anath, Guo, L. Jay & Chen, Ray T. Metrology and instrumentation challenges with high-rate, roll-to-roll manufacturing of flexible electronic systems. Omega Optics, Inc., University of Texas, University of Michigan.
- 67 Printed Electronics Factory Automation. Verkkodokumentti. Focalspec. <<http://www.focalspec.com/application/pinted-electronics-factory-automation/>>. Luettu 17.3.2017.
- 68 Painetun elektroniikan pilottiympäristö. Verkkodokumentti. VTT. <<http://www.vtt.fi/palvelut/liiketoiminnan-kehitt%C3%A4minen/pilot-laitokset-ja-tk-infrastruktuuuri/painetun-%C3%A4lykkyiden-pilotymp%C3%A4rist%C3%B6>>. Luettu 20.4.2016.
- 69 Mäkimartti, Oskari. 2016. Painettavan pinnoitteen tuotannollistaminen. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu.
- 70 PrintoCent: Commercializing Printed Intelligence and Optical Measurement Technologies. Verkkodokumentti. PrintoCent. <<http://www.printocent.net/filespec/assets/common/downloads/publication.pdf>>. Luettu 20.3.2017.
- 71 Clouthury, I. A. & Shirley, S. 2009. Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation. Optics & Laser Technology, Vol. 42, No. 3, s. 503–508.
- 72 Ghavidel, Ayob Karimzad, Azdasr, Taher, Shabgard, Mohammed Reza, Navidfar, Amir & Shishavan, Sajjad Mamaghani. 2014. Effect of carbon nanotubes on laser cutting of multi-walled carbon nanotubes/poly methyl methacrylate nanocomposites. Optics & Laser Technology, Vol 67, s. 119–124.
- 73 Partners. Verkkodokumentti. Canatu. <<http://old.canatu.com/partners/>>. Luettu 28.3.2017.
- 74 Custom made machinery. Verkkodokumentti. Coatema. <<http://www.coatema.de/en/produkte/sondermaschinen.html>>. Luettu 28.3.2017.

Mittaustilanteiden olosuhteet

Ennen mittauksia																
Sensori 1			Sensori 2			Sensori 3			Sensori 4			Sensori 5				
T(°C)	RH(%)	P(mBar)	T(°C)2	RH(%)3	P(mBar)4	T(°C)3	RH(%)4	P(mBar)5	T(°C)4	RH(%)5	P(mBar)6	T(°C)5	RH(%)6	P(mBar)7		
1.12.2015	21,40	30,20	987,90	22,10	28,40	988,90	20,80	32,80	988,20	21,50	27,90	988,20	21,40	30,80	987,60	
2.12.2015	21,00	25,90	1006,40	20,50	23,40	1007,40	20,60	25,90	1006,70	21,40	25,50	1006,70	20,70	26,60	1006,10	
3.12.2015	20,80	30,90	1010,80	21,10	34,50	1011,80	20,80	31,00	1011,10	20,80	30,90	1011,20	21,00	35,50	1010,70	

Kesken mittauksen																
Sensori 1			Sensori 2			Sensori 3			Sensori 4			Sensori 5				
T(°C)	RH(%)	P(mBar)	T(°C)2	RH(%)3	P(mBar)4	T(°C)3	RH(%)4	P(mBar)5	T(°C)4	RH(%)5	P(mBar)6	T(°C)5	RH(%)6	P(mBar)7		
1.12.2015	21,20	29,60	989,00	21,60	27,50	990,00	20,80	30,90	989,30	21,40	28,00	989,20	21,20	29,00	988,90	

Mittausten lopuksi																
Sensori 1			Sensori 2			Sensori 3			Sensori 4			Sensori 5				
T(°C)	RH(%)	P(mBar)	T(°C)2	RH(%)3	P(mBar)4	T(°C)3	RH(%)4	P(mBar)5	T(°C)4	RH(%)5	P(mBar)6	T(°C)5	RH(%)6	P(mBar)7		
1.12.2015	21,30	28,70	990,80	22,30	25,90	992,00	20,90	29,50	991,30	21,50	27,60	991,20	21,20	28,30	990,70	
2.12.2015	21,30	25,50	1008,60	22,40	22,90	1009,60	21,00	24,90	1009,10	21,40	24,00	1009,00	21,20	24,80	1008,50	
3.12.2015	21,4	31,1	1011,2	22,4	35,1	1012,1	21	33	1011,5	21,5	33,2	1011,4	21,3	34,6	1010,8	

Havaintoasema: Espoo Tapiola

Tuorein säähavainto:

1.12.2015 15:30 Suomen aikaa

Lämpötila

3,2 °C

Kosteus

81 %

Kastepiste

0,4 °C

Länsituulta

6 m/s

Puuska

8 m/s

Paine

990,4 hPa

Tunnin sadekertymä

0,0 mm (15:00)

Lumensyvyys

0 cm

Melkein pilvistä

(7/8)

Näkyvyys

yli 20 km

Havaintoasema: Espoo Tapiola

Tuorein säähavainto:

2.12.2015 11:00 Suomen aikaa

Lämpötila

1,0 °C

Kosteus

79 %

Kastepiste

-2,3 °C

Luoteistuulta

5 m/s

Puuska

8 m/s

Paine

1008,0 hPa

Tunnin sadekertymä

0,0 mm

Lumensyvyys

0 cm

Pilvisyys: selkeää

(0/8)

Näkyvyys

yli 20 km

Havaintoasema: Espoo Tapiola

Tuorein säähavainto:

3.12.2015 12:20 Suomen aikaa

Lämpötila

7,5 °C

Kosteus

95 %

Kastepiste

6,8 °C

Lounaistuulta

5 m/s

Puuska

7 m/s

Paine

1011,0 hPa

Tunnin sadekertymä

0,0 mm (12:00)

Lumensyvyys

0 cm

Pilvistä

(8/8)

Näkyvyys

7 km

Mittaustulokset

Stability over time

taajuus 100 kHz

Measuring stick(sens1)	Sensor 1 näplätty		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4		Sensor 5		Sensor 6		Sensor 7		Sensor 8		Sensor 9		Sensor 10	
	R1 (Ω)	C1 (pF)	R2 (Ω)	C2 (pF)	R3 (Ω)	C3 (pF)	R4 (Ω)	C4 (pF)	R5 (Ω)	C5 (pF)	R6 (Ω)	C6 (pF)	R7 (Ω)	C7 (pF)	R8 (Ω)	C8 (pF)	R9 (Ω)	C9 (pF)	R10 (Ω)	C10 (pF)
1.12.2015	237,60	13,78	1,8*10 ³	14,16	2,38M	14,25	8,88	13,59	33,00	13,16	4,00	14,00	3,40	14,00	2,10	13,80	3,10	13,60	4,30	14,00
2.12.2015	248,50	13,77	2,4*10 ³	13,90	9,20	14,00	2,40	14,10	10,10	13,50	2,7*10 ³	14,20	3,20	14,00	1,90	14,00	2,10	13,30	12,00	14,40
3.12.2015	19,00	13,80	4,80	33,60	2,2*10 ³	14,50	10,50	35,50	36,00	14,60	4,00	14,30	3,30	13,80	5,20	14,30	3,40	22,00	2,7*10 ³	14,30

	Sensor 11		Sensor 12		Sensor 13		Sensor 14		Sensor 15		Sensor 16		Sensor 17		Sensor 18		Sensor 19		Sensor 20	
	R11 (Ω)	C11 (pF)	R12 (Ω)	C12 (pF)	R13 (Ω)	C13 (pF)	R14 (Ω)	C14 (pF)	R15 (Ω)	C15 (pF)	R16 (Ω)	C16 (pF)	R17 (Ω)	C17 (pF)	R18 (Ω)	C18 (pF)	R19 (Ω)	C19 (pF)	R20 (Ω)	C20 (pF)
1.12.2015	3,60	13,90	3,80	13,30	14,17	7,54	3,10	14,20	3,50	13,80	3,40	13,90	4,00	13,70	8,60	14,20	5,40	13,90	5,90	14,20
2.12.2015	3,50	13,90	5,80	13,80	3,50	7,20	3,50	13,80	6,10	13,90	26,60	13,70	5,20	14,30	5,50	14,90	2,50	13,40	6,00	14,10
3.12.2015	11,70	14,00	4,00	14,20	2,90	7,30	14,80	13,80	2,5*10 ³	14,20	4,00	13,90	13,60	16,60	6,80	13,90	3,60	13,90	3,90	13,90

init = initial
subi=submerged inside glass
subo=submerged outside glass
hsubi=half submerged in

Sensitivity to liquid

Sensor1										
Measuring stic(sens2)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	244.6k	13.94	244.2k	13.75	245k	13.84	102k	37.63	65.60	62.20
2.12.2015	248.5k	13.77	247.7k	13.85	248.6k	13.68	116k	34.30	65.4k	63.60
3.12.2015	19.00	13.80	216.00	13.80	226.00	13.80	92.50	37.60	63.50	61.00

Sensor 4										
Measuring stick(sens2)	Rinit (Q)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	8,88k	13,50	4,7k	14,00	3,88k	13,85	9,7k	46,95	9,16k	72,28
2.12.2015	2,40	14,10	4,50	14,40	4,20	14,50	2,70	36,00	2,50	62,90
3.12.2015	10,50	35,50	16,60	35,30	15,60	34,20	12,30	52,20	11,60	79,30

Sensor7										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	3,4k	14,00	3,3k	13,80	3,3k	13,90	3,7k	47,00	3,7k	73,30
2.12.2015	3,20	14,00	3,40	13,80	3,40	13,70	3,80	40,70	3,70	64,80
3.12.2015	3,30	13,80	5,50	13,90	5,90	13,90	3,20	36,20	3,10	60,80

Sensor10										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	4,3k	14,00	4k	13,90	4,1k	13,70	6,6k	43,60	5,7k	73,40
2.12.2015	12,00	14,40	5,50	13,80	5,30	14,00	11,80	39,50	11,60	65,80
3.12.2015	2,7*10 ⁹	14,30	2,70	14,30	2,80	14,20	157,50	42,80	91,20	66,40

Sensor13										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Q)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	14,171k	7,54	14,2k	7,20	14,2k	7,20	13,6k	19,30	12,9k	39,40
2.12.2015	3,50	7,20	3,20	6,80	3,40	6,90	3,70	14,60	3,70	32,50
3.12.2015	2,90	7,30	3,20	6,80	6,10	7,00	3,30	13,40	3,30	23,30

Sensor16										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	3.4k	13,90	3,9k	13,90	3,9k	13,90	4,4k	44,20	4,2k	72,90
2.12.2015	26,60	13,70	22,00	14,00	25,80	14,00	17,00	36,00	15,10	62,70
3.12.2015	4,00	13,90	4,00	13,80	4,10	13,80	4,00	33,40	3,80	63,20

Sensor19										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	5,4k	13,90	4,9k	13,80	5,3k	13,80	5,6k	42,30	5,3k	73,30
2.12.2015	2,50	13,40	3,30	13,50	3,30	13,40	2,90	37,60	2,90	63,00
3.12.2015	3,60	13,90	4,50	13,80	4,30	13,90	5,00	41,10	4,80	64,70

Sensor 2										
Measuring stick(sens2)	Rinit (Q)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	1.8M	14.16	2.33M	14.24	2.18M	14.29	63.5k	50.25	47.2k	75.30
2.12.2015	2.4*10 ⁹	13.90	2.3*10 ⁹	14.30	2.4*10 ⁹	14.15	170.00	37.00	82.00	63.00
3.12.2015	4.80	33.60	56.00	23.10	4.90	14.40	5.20	41.40	5.30	64.40

Sensor 5										
Measuring stick(sens2)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	33k	13,16	8,6k	12,70	3,3k	13,00	12,0k	43,90	10,1k	67,50
2.12.2015	10,10	13,50	4,00	13,40	4,00	13,40	24,00	39,50	21,00	63,00
3.12.2015	36,00	14,60	13,80	14,60	12,60	14,50	96,50	39,50	61,00	64,80

Sensor 8										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	2,1k	13,80	2,1k	13,80	3,2k	14,10	2,5k	39,00	2,36k	64,00
2.12.2015	1,90	14,00	7,90	13,90	13,10	14,30	1,90	34,00	1,90	61,50
3.12.2015	5,20	14,30	5,20	6,70	6,20	13,30	5,20	40,20	4,90	64,00

Sensor 11										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	3,6k	13,90	4,6k	13,90	4,7k	14,00	4,3k	4,70	4,2k	72,10
2.12.2015	3,50	13,90	3,90	13,90	3,90	13,70	3,50	35,10	3,40	63,00
3.12.2015	11,70	14,00	9,10	14,00	10,00	13,90	13,20	42,20	12,10	63,70

Sensor 14										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	3,1k	14,20	3,2k	13,70	3,3k	13,70	53,1k	41,20	4,7k	69,80
2.12.2015	3,50	13,80	3,60	13,60	3,70	13,80	3,20	35,80	3,20	64,40
3.12.2015	14,80	13,80	11,90	14,00	23,10	13,90	17,20	43,00	17,50	66,60

Sensor 17										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Q)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	4,0k	13,70	9,9k	13,60	9,8k	13,60	6,3k	41,80	3,1k	165,00
2.12.2015	5,20	14,30	5,70	13,90	7,10	13,80	5,00	34,40	4,80	58,10
3.12.2015	13,60	16,80	12,00	17,30	13,50	18,20	13,20	51,20	11,50	80,00

Sensor 20										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	5,9k	14,20	5,5k	14,00	5,8k	14,10	8,5k	39,70	7,6k	66,90
2.12.2015	6,00	14,10	5,90	13,90	6,00	14,00	5,60	35,00	5,30	56,80
3.12.2015	3,90	13,90	5,30	14,30	5,30	14,20	4,50	41,00	4,30	63,00

Sensor 3										
Measuring stick(sens2)	Rinit (Q)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	2.38M	14.25	2.3M	14.30	2.3M	14.28	100.3k	45.75	60k	69.00
2.12.2015	9.20	14.00	14.60	14.50	14.00	14.70	31.50	40.30	25.50	63.50
3.12.2015	2.2*10 ⁹	14.50	2.2*10 ⁹	14.50	2.2*10 ⁹	14.40	130.00	44.30	76.20	68.00

Sensor 6										
Measuring stick(sens2)	Rinit (Q)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	4k	14,00	20,0k	14,00	22,0k	14,20	4,55k	42,60	4k	70,50
2.12.2015	2,7*10 ⁹	14,20	2,6*10 ⁹	14,20	2,7*10 ⁹	14,20	187,00	38,90	91,00	64,80
3.12.2015	4,00	14,30	4,10	14,20	4,10	14,30	4,50	39,20	4,50	67,80

Sensor 9										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	3,1k	13,60	3,3k	13,80	3,4k	13,70	3,25k	43,00	3,2k	69,70
2.12.2015	2,10	13,30	3,20	13,70	3,20	13,70	2,30	36,20	2,20	60,40
3.12.2015	3,40	22,00	7,00	23,00	6,90	25,00	3,70	54,90	3,50	75,70

Sensor 12										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	3,8k	13,30	8,30	13,60	11,10k	13,10	6,9k	45,20	6,6k	70,00
2.12.2015	5,80	13,80	4,80	13,70	5,00	13,70	5,70	39,60	5,70	63,10
3.12.2015	4,00	14,20	4,10	14,00	4,30	13,90	4,60	42,00	4,40	64,00

Sensor 15											
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)	
1.12.2015	3,5k	13,80	3,6k	13,90	3,2k *	14 *		3,90	41,80	3,9k	67,50
2.12.2015	6,10	13,90	6,50	12,60	6,90	13,20	10,60	39,50	9,90	63,50	
3.12.2015	2,5*10 ⁹	14,20	2,5*10 ⁹	14,30	2,5*10 ⁹	14,30	58,50	42,70	48,80	65,00	

Sensor 18										
Measuring stick(sens4)	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	Rsubo	Csubo	Rhsubo	Chsubo	Rhsubi	Chsubi	Rsubi	Csubi (pF)
1.12.2015	8,6k	14,20	7,3k	13,50	8,3k	13,70	4,6k	42,70	4,6k	71,90
2.12.2015	5,50	14,90	5,10	14,60	5,00	14,60	5,20	39,70	4,90	64,30
3.12.2015	6,80	13,90	6,20	14,20	6,50	13,00	8,60	39,40	6,90	63,80

res tippu,
faradit samana,
wotasko

*huom otettu
vimeisenä eli
eri init arvolla

luratti eli katu

Sensitivity to mediums that have absorbed/adsorbed liquid

Sensor 1

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	242,4k	14,25	242,90	14,30	minus 8,7	14,40
2.12.2015	240,8k	14,26	242,40	14,40	347,00	17,00
3.12.2015	164,00	14,00	247,50	14,00	357,00	14,30

Sensor 5

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	121,5k	13,45	2,6k	12,80	2,1k	14,80
2.12.2015	65,00	14,00	5,70	13,20	9,40	16,00
3.12.2015	1,1*10 ³	15,20	13,00	19,10	17,00	18,00

wet paper

Sensor 9

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	6k	14,55	5,9k	14,00	6,8k	13,60
2.12.2015	3,00	14,20	5,90	14,00	6,00	14,70
3.12.2015	5,50	27,80	2,1*10 ³	14,60	-1300,00	16,00

Sensor 13

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	14,2k	7,65	9,2k	7,30	13,8k	7,70
2.12.2015	8,80	7,30	5,10	7,40	4,50	7,00
3.12.2015	5,60	7,70	5,30	7,60	5,10	6,20

Sensor 17

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	4,9k	26,10	20,9k	15,30	170k	19,00
2.12.2015	8,50	14,30	35,00	14,40	40,00	14,80
3.12.2015	58,00	26,90	10,50	14,60	12,60	17,00

wet paper heittelehti

Sensor 2

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	1,39M	14,20	1,56M	14,57	420k	4,17
2.12.2015	1,5*10 ³	14,20	1,8*10 ³	14,60	-1500,00	17,30
3.12.2015	10,60	15,00	6,70	40,40	17,10	46,50

Sensor 6

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	5,3k	14,20	156k	14,50	9,0k	13,00
2.12.2015	2,2*10 ³	14,40	2,2*10 ³	14,40	-1700,00	16,60
3.12.2015	1,8*10 ³	14,70	390,00	14,80	-1300,00	15,70

Sensor 10

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	9,9k	14,80	5,2k	14,50	5,8k	16,60
2.12.2015	77,00	14,50	6,00	14,10	6,70	13,20
3.12.2015	2,2*10 ³	14,50	2,3*10 ³	14,50	-1000,00	16,10

wet pap

Sensor 14

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	8,6k	14,40	4,1k	14,00	5,1k	17,70
2.12.2015	3,30	14,00	8,50	14,00	9,20	16,60
3.12.2015	1,9*10 ³	14,50	2,2*10 ³	14,60	-1100,00	17,50

Sensor 18

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	7,9k	14,10	9,1k	14,00	9,4k	16,90
2.12.2015	8,20	15,40	8,00	15,50	8,30	16,40
3.12.2015	16,90	14,80	7,20	14,30	8,00	17,40

Sensor 3

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	1,45M	14,73	9,0k	14,00	40,9k	14,25
2.12.2015	244,00	14,50	6,70	14,00	9,00	17,00
3.12.2015	1,5*10 ³	15,10	75,60	15,00	37,50	15,70

Sensor 7

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	6,9k	14,30	3,85k	14,00	4,2k	14,00
2.12.2015	5,80	15,10	4,00	14,20	4,10	17,00
3.12.2015	5,50	14,50	9,30	13,50	10,20	14,30

Sensor 11

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	7,6k	14,00	9,4k	13,80	11k	17,00
2.12.2015	4,10	14,30	5,70	14,40	5,70	15,80
3.12.2015	15,80	14,60	12,00	15,00	18,50	15,20

Sensor 15

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	6,4k	13,40	4,3k	14,40	5,2k	18,00
2.12.2015	90,00	14,60	4,80	13,70	14,40	16,40
3.12.2015	650,00	14,50	1,8*10 ³	14,70	-1500,00	16,40

Sensor 19

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	7k	13,80	22k	14,60	12,7k	16,60
2.12.2015	7,00	13,80	4,60	13,80	5,30	14,40
3.12.2015	14,50	14,70	7,00	13,50	7,30	15,20

Sensor 4

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	20,6k	14,10	3,9k	14,10	6,7k	15,85
2.12.2015	4,00	15,10	6,00	14,60	6,50	15,00
3.12.2015	15,00	26,00	116,00	20,30	60,60	15,00

wet pap

Sensor 8

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	3,5k	15,00	1,7k	13,50	4,8k	14,40
2.12.2015	2,60	14,50	1,9*10 ³	15,20	-1800,00	17,10
3.12.2015	8,80	15,00	18,00	14,50	16,50	15,00

Sensor 12

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	10,3k	14,30	10k	14,50	14,7k	17,80
2.12.2015	61,00	14,40	6,80	136,00	6,20	15,40
3.12.2015	14,10	15,10	5,00	14,10	6,10	16,10

märin pap

Sensor 16

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	4,5k	14,40	4,7k	14,40	4,4k	16,40
2.12.2015	14,80	14,10	14,60	14,00	14,80	16,40
3.12.2015	6,20	14,40	11,50	14,10	8,30	15,50

Sensor 20

	Rinit (Ω)	Cinit (pF)	RdryP (Ω)	CdryP (pF)	RwetP (Ω)	CwetP (pF)
1.12.2015	10,2k	14,20	7k	13,90	8,4k	15,50
2.12.2015	7,10	13,90	8,60	13,70	8,10	16,00
3.12.2015	8,70	14,20	5,00	14,60	6,80	15,50